

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2004 年 9 月 16 日 (16.09.2004)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2004/079388 A1

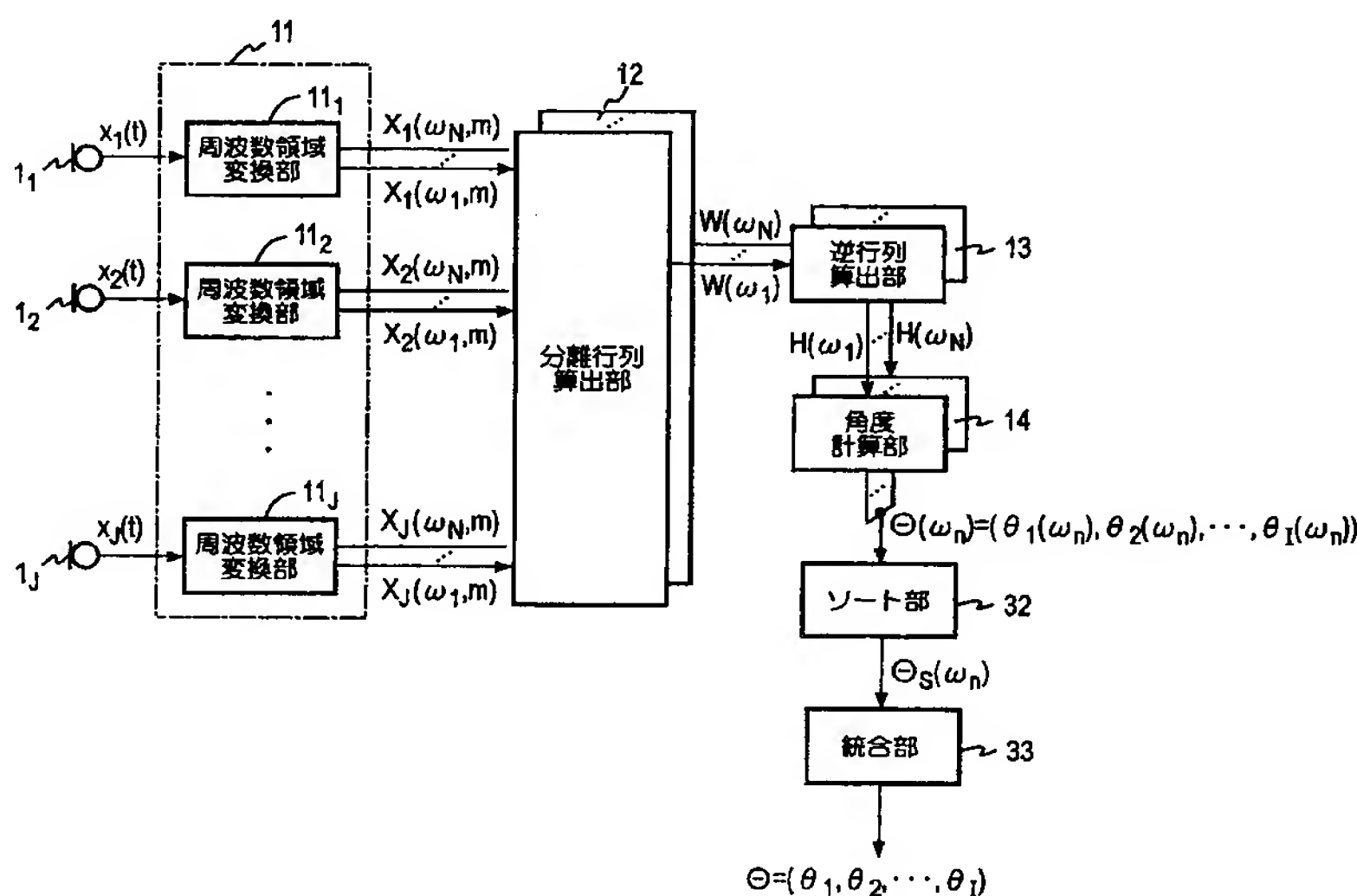
(51) 国際特許分類⁷: G01S 3/46, 3/802
(21) 国際出願番号: PCT/JP2004/002610
(22) 国際出願日: 2004 年 3 月 3 日 (03.03.2004)
(25) 国際出願の言語: 日本語
(26) 国際公開の言語: 日本語
(30) 優先権データ:
特願2003-057070 2003 年 3 月 4 日 (04.03.2003) JP
特願2003-297580 2003 年 8 月 21 日 (21.08.2003) JP
(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 日本電信電話株式会社 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 Tokyo (JP).

(72) 発明者; および
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 澤田 宏 (SAWADA, Hiroshi) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町三丁目 9 番 1 1 号 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 向井 良 (MUKAI, Ryo) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町三丁目 9 番 1 1 号 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 荒木 章子 (ARAKI, Shoko) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町三丁目 9 番 1 1 号 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 牧野 昭二 (MAKINO, Shoji) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町三丁目 9 番 1 1 号 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP).
(74) 代理人: 草野 卓, 外 (KUSANO, Takashi et al.); 〒1600022 東京都新宿区新宿四丁目 2 番 2 1 号相模ビル Tokyo (JP).

[続葉有]

(54) Title: POSITION INFORMATION ESTIMATION DEVICE, METHOD THEREOF, AND PROGRAM

(54) 発明の名称: 位置情報推定装置、その方法、及びプログラム



(57) Abstract: Observation signals $x_i(t)$ to $x_j(t)$ from a plurality of sensors arranged in two-dimensional way are subjected to the Fourier transform for a short period of time. From these, signals $X_i(\omega_1) \sim X_i(\omega_N)$, $\sim X_j(\omega_1) \sim X_j(\omega_N)$ are generated, and separation matrix $W(\omega_1) \sim W(\omega_N)$ are generated by the independent component analysis method. The inverse matrix of it $H(\omega_1) \sim H(\omega_N)$ are calculated. For an element pair of each column $H_{ji}(\omega_n)$ and $H_{j'i'}(\omega_n)$ for each ω_n ($n = 1, \dots, N$), an angle $\theta_{i,jj'}(\omega_n) = \cos^{-1}(\arg(H_{ji}(\omega_n)/H_{j'i'}(\omega_n))/(\omega_n c^{-1}|d_j - d_{j'}|))$ is calculated. The $\arg(\alpha)$ is a deflection angle of α , the c is a signal propagation speed, and the $|d_j - d_{j'}|$ is an interval between the sensor j and j' . Columns are reshuffled so that the $\theta_{i,jj'}(\omega_n)$ obtained from each column is in the ascending order in the $H(\omega_1) \sim H(\omega_N)$. For the columns which cannot be reshuffled, $|q_i - d_{j'}|/|q_i - d_j| = |H_{ji}(\omega_n)/H_{j'i'}(\omega_n)| = DR_{i,jj'}(\omega_n)$ is solved for q_i , and $R_{i,jj'}(\omega_n) = |DR_{i,jj'}(\omega_n)(d_j - d_{j'})/(DR_{i,jj'}^2(\omega_n) - 1)|$ is calculated. The columns of the $H(\omega_n)$ are reshuffled so that the $R_{i,jj'}(\omega_n)$ is in the ascending order. By using this $H(\omega_n)$, permutation of the

$W(\omega_n)$ is solved.

[続葉有]



(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
— 国際調査報告書

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL,

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約:

2次元配置された複数のセンサよりの観測信号 $x_1(t) \sim x_J(t)$ を短時間フーリエ変換し、これらから信号 $X_1(\omega_1) \sim X_1(\omega_N)$, $\sim X_J(\omega_1) \sim X_J(\omega_N)$ 、独立成分分析法により分離行列 $W(\omega_1) \sim W(\omega_N)$ を生成し、その逆行列 $H(\omega_1) \sim H(\omega_N)$ を計算し、各 ω_n ($n = 1, \dots, N$) ごとに、 $H(\omega_n)$ の各列の要素対 $H_{ji}(\omega_n)$ 及び $H_{j'i}(\omega_n)$ について、角度 $\theta^{i,j,j'}(\omega_n) = \cos^{-1}(\arg(H_{ji}(\omega_n) / H_{j'i}(\omega_n)) / (\omega_n c^{-1} \|d_j - d_{j'}\|))$ を計算し、 $\arg(\alpha)$ は α の偏角、 c は信号の伝搬速度、 $\|d_j - d_{j'}\|$ はセンサ j と j' の間隔である。 $H(\omega_1) \sim H(\omega_N)$ において各列から得られる $\theta^{i,j,j'}(\omega_n)$ が昇順になるように、列の入れ替えを行い、列の入れ替えができない列について、 $\|q_i - d_{j'}\| / \|q_i - d_j\| = |H_{ji}(\omega_n) / H_{j'i}(\omega_n)| = DR_{i,j,j'}(\omega_n)$ を q_i について解いて $R_{i,j,j'}(\omega_n) = \|DR_{i,j,j'}(\omega_n)(d_j - d_{j'}) / (DR_{i,j,j'}^2(\omega_n) - 1)\|$ を計算し、この $R_{i,j,j'}(\omega_n)$ が昇順になるように当該 $H(\omega_n)$ の列を入れ替え、この $H(\omega_n)$ を用いて $W(\omega)$ のパーミュテーションを解決する。

明 細 書

位置情報推定装置、その方法、及びプログラム

5 技術分野

この発明は音源や電波源などの信号源の複数から放射され、互いに混合された信号を複数のセンサで観測して、各信号源の位置情報、正しくは位置を表わすパラメータの少なくとも1つを含む情報を推定し、信号の到来方向の検出や、信号源ごとの信号に分離復元に適用される装置、その方法、及びプログラムに関する。

10

背景技術

複数の信号源からの各信号が空間内で混合されて複数のセンサに到来し、これらセンサで観測された到来信号から、各源信号の到来方向の推定や各源信号を分離することを、その源信号の混合系の情報を知らずに、独立成分分析(Independent Component Analysis、以後、ICAと記述する場合もある)により行うことが提案されている。空間内での前記混合は信号源からセンサまでの到達遅延及び減衰度が直接波と障害物などによる複数の反射波で異なるため、ある信号は複数の時間遅れを持って混合された畳み込み混合となる。時間領域で直接分離フィルタを求めるICAは最終的な解への収束が非常に遅いため、周波数領域で周波数毎にICAを適用する方法が現実的である。

20

[到来方向推定]

周波数領域でのICAを用いて信号源の方向を位置情報として推定する従来技術を図1を参照して簡単に説明する。J個のセンサ $1_1, 1_2, \dots, 1_J$ が直線状に配列されている。センサ 1_j ($j = 1, 2, \dots, J$)の位置を d_j 、そのセンサ 1_j での観測信号を $x_j(t)$ とする。センサ $1_1, \dots, 1_J$ の配列方向と垂直な方向を 90° とし、源信号 $s_i(t)$ の到来方向を $0^\circ \leq \theta_i \leq 180^\circ$ とする。I個の源信号 $s_1(t), \dots, s_I(t)$ の混合信号をJ個のセンサ $1_1 \sim 1_J$ により、観測信号 $x_1(t), \dots, x_J(t)$ として検出しているものとする。

25

信号の到来方向の推定は周波数領域で行われることが多い。これには、観測信

号 $x_j(t)$ を短時間フーリエ変換して周波数領域における時間系列信号 $X_j(\omega, m)$ を求める。 ω は角周波数 (周波数を f とすると $\omega = 2\pi f$) m は時刻を表す番号である。源信号 $s_i(t)$ ($i = 1, \dots, I$) も、同様に、周波数領域における時間系列 $S_i(\omega, m)$ に変換したものとすると、観測信号 $X_j(\omega, m)$ は、信号 s_i の

5 信号源からセンサ 1_j への周波数応答 $A_{ji}(\omega)$ を用い $X_j(\omega, m) = \sum_{i=1}^I A_{ji}(\omega) S_i(\omega, m)$

と表現することができる。ベクトルと行列を用いると、

$$X(\omega, m) = A(\omega) S(\omega, m) \quad \dots (1)$$

となる。ここで、

$$10 \quad X(\omega, m) = [X_1(\omega, m), \dots, X_J(\omega, m)]^T \quad \dots (2)$$

$$S(\omega, m) = [S_1(\omega, m), \dots, S_I(\omega, m)]^T \quad \dots (3)$$

はそれぞれ、 J 個のセンサによる観測信号および I 個の源信号をベクトル表現したものである。 $A(\omega)$ は周波数応答 $A_{ji}(\omega)$ を要素とする $J \times I$ 行列であり、信号混合系の周波数応答を表現するので混合行列と呼ばれる。 $[a]^T$ はベクトル

15 又は行列 a の転置を表わす。

図 1 において、方向 θ_i から到来する源信号は、 $d_i = 0$ の位置のセンサ 1_i に対し、センサ 1_j にも $\tau_{ji} = c^{-1} d_j \cos \theta_i$ だけ速く到達する。 c は源信号 s_i の速度である。従って、直接波のみを考慮すると角周波数 ω における周波数応答は

$$A_{ji}(\omega) = \exp(j \omega c^{-1} d_j \cos \theta_i) \quad \dots (4)$$

20 とモデル化することができる。方向 θ を変数とする到来方向ベクトルを

$$a(\omega, \theta) = [\exp(j \omega c^{-1} d_1 \cos \theta), \exp(j \omega c^{-1} d_2 \cos \theta), \dots, \exp(j \omega c^{-1} d_J \cos \theta)]^T$$

と表現すると、観測信号は

$$X(\omega, m) = \sum_{i=1}^I a(\omega, \theta_i) S_i(\omega, m)$$

とも近似表現することができる。

25 独立成分分析を用いて信号源の方向を推定する方法については例えば S. Kurita, H. Saruwatari, S. Kajita, K. Takeda, and F. Itakura, "Evaluation of blind signal separation method using directivity pattern under reverberant conditions," in Proc. ICASSP2000, 2000, pp. 3140-3143 (文献 1 という) に示されている。この方法を以下に簡単に述べる。

観測信号 $X(\omega, m)$ は $X(\omega, m) = A(\omega) S(\omega, m)$ であり、源信号 $S(\omega, m)$ が混合されたものであるので、互いに独立ではない。 $X(\omega, m)$ に独立成分分析

$$Y(\omega, m) = W(\omega) X(\omega, m) \quad \dots (5)$$

5 を適用すると、互に独立な分離信号

$$Y(\omega, m) = [Y_1(\omega, m), \dots, Y_I(\omega, m)]^T \quad \dots (6)$$

が得られる。

$W(\omega)$ は要素が $W_{ij}(\omega)$ である $I \times J$ の行列であり、分離行列と呼ばれる。例えば、 $I = J = 2$ の場合、独立成分分析は、 $Y_1(\omega, m)$ と $Y_2(\omega, m)$ が互いに独立になる様に

$$\begin{bmatrix} Y_1(\omega, m) \\ Y_2(\omega, m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11}(\omega) & W_{12}(\omega) \\ W_{21}(\omega) & W_{22}(\omega) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1(\omega, m) \\ X_2(\omega, m) \end{bmatrix}$$

を満足する分離行列 $W(\omega)$ を求める。源信号 $S_1(\omega, m), \dots, S_I(\omega, m)$ が互いに独立であれば、分離信号 $Y_1(\omega, m), \dots, Y_I(\omega, m)$ はそれぞれ、源信号の何れかに対応する。但し、独立成分分析は信号の独立性のみに基づいているところから、分離信号の順序と大きさに関して任意性がある。即ち、分離行列 $W(\omega)$ の行を入れ換えても、 $W(\omega)$ の行を定数倍しても、独立成分分析の解である。なお後で述べるが順序の任意性はパーミュテーションの問題となり、大きさの任意性はスケーリングの問題となる。

分離行列 $W(\omega)$ の i 行目は、

$$w_i(\omega) = [W_{i1}(\omega), \dots, W_{iJ}(\omega)]$$

である。この $w_i(\omega)$ は分離信号 $Y_i(\omega, m)$ を作り出していることが分かる。従って、 $w_i(\omega)$ は、源信号 $S_1(\omega, m), \dots, S_I(\omega, m)$ の何れか 1 つを強調して取り出し、それ以外を抑圧している。 $w_i(\omega)$ が形成する指向特性を解析することにより、何れの方向から到来する信号を取り出し、何れの方向から到来する信号を抑圧しているかを解析することができ、この解析により、源信号 $s_i(t)$ の到来方向を推定することができる。これを全ての $w_i(\omega)$, $i = 1, \dots, I$ に対して行

うと、分離行列の $W(\omega)$ 各行 $w_i(\omega)$ が取り出している源信号の到来方向 $\Theta(\omega) = [\theta_1(\omega), \dots, \theta_I(\omega)]^T$ を推定することができる。

$w_i(\omega)$ が形成する指向特性は、到来方向ベクトル $a(\omega, \theta)$ を用いて $B_i(\omega, \theta) = w_i(\omega) a(\omega, \theta)$ と表現することができる。この $B_i(\omega, \theta)$ は方向 θ にある源信号から、分離信号 $Y_i(\omega, m)$ への周波数応答と考えられる。周波数 3156 Hz において独立成分分析後の指向特性のゲイン $|B_i(\omega, \theta)|$ 特性を図 2 に示す。図 2 の横軸は θ を、縦軸はゲインを表わす。実線は分離行列の 1 行目が与える指向特性 $|B_1(\omega, \theta)|$ であり、破線は 2 行目が与える指向特性 $|B_2(\omega, \theta)|$ である。実線は 55° でゲインが最小となっており、破線は 121° でゲインが最小となっている。このことから、分離行列の 1 行目は 55° から到来する信号を抑圧して 121° から到来する信号を取り出し、逆に分離行列の 2 行目は 121° から到来する信号を抑圧して 55° から到来する信号を取り出している。従って、 $\Theta(3156 \text{ Hz}) = [121^\circ, 55^\circ]^T$ と推定することができる。

複数の信号源方向を複数センサを用いて、センサの観測信号を周波数領域に変換して推定する方法として、MUSIC (Multiple Signal Classification) 法がある (例えば S. Unnikrishna Pillai, "Array Signal Processing", Springer-Verlag, 1989, ISBN 0-387-96951-9, ISBN 3-540-96951-9 参照)。この方法はセンサの数 J より 1 個少ない ($J - 1$) 個までしか信号源の方向を推定できない。しかし前記独立成分分析 (ICA) を用いる方法 (以下単に ICA 法ともいう) によれば 2 つのセンサで 2 信号の混合に対応することができ、この点で、MUSIC 法より優れている。しかし、上記の ICA を用いる方法では 3 信号以上の混合に対処するには以下に示すように困難を伴う。また、指向特性のゲインの最小値を求める操作に多くの計算を要することも欠点である。

3 信号の混合に対して 3 つのセンサを用いて ICA 法を適用した状況を説明する。この場合の ICA は分離行列が 3×3 になるだけで同様に行えるが、指向特性のゲインを解析するのに困難を伴う。この場合の ICA 後の周波数 2734 Hz において指向特性のゲイン $|B_i(\omega, \theta)|$ を図 3 に示す。図 3 の実線は分離行列の 1 行目が、破線は 2 行目が、一点鎖線は 3 行目がそれぞれ与える指向特性で

ある。この場合、各源信号は分離行列のある行によって強調され、他の2つの行によって抑圧される筈である。しかし、抑圧する2つの行が同じ方向で抑圧しているとは限らない。例えば、図3においては45°付近で $|B_2|$ と $|B_3|$ が共に極小となり、 $w_1(\omega)$ が45°付近の源信号を取り出し、 $w_2(\omega)$ 及び $w_3(\omega)$ はこの源信号を抑圧している。同様に90°付近で $|B_1|$ 及び $|B_3|$ が極小となり、 $w_2(\omega)$ で90°付近の源信号を取り出し、 $w_1(\omega)$ 及び $w_3(\omega)$ でこの信号を抑圧していると読み取れる。しかし $w_3(\omega)$ が120°付近の源信号を取り出し、 $w_1(\omega)$ および $w_2(\omega)$ がこの源信号を抑圧していると考えられるが、120°付近での $|B_1|$ 及び $|B_2|$ の極小がかなりずれている。この様なずれが大きくなると、何れの方法の抑圧が何れの源信号に対応するか判然としなくなる。従って、ICA法による従来技術を3信号以上の状況に対して適用するのは困難であると考えられる。

〔ブラインド信号分離〕

次にICAを用いたブラインド信号分離の従来技術を説明する。ブラインド信号分離とは、観測された混合信号から源信号を推定する技術である。以下では、I個の源信号が混在した混合信号がJ個のセンサで観測される場合を例にとって説明する。

信号源*i*から発生した源信号を $s_i(t)$ ($i = 1, \dots, I$ 、 t は時刻)、センサ*j*で観測された混合信号を $x_j(t)$ ($j = 1, \dots, J$)とすると、混合信号 $x_j(t)$ は次式で表わせる。

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^I (a_{ji} * s_i)(t) \quad \dots (7)$$

ここで、 a_{ji} は信号源*i*からセンサ*j*へのインパルス応答、 $*$ は畳み込み演算子である。ブラインド信号分離の目的は、観測信号 $x_j(t)$ のみを用いて、分離のためのフィルタ w_{kj} 及び分離信号 $y_k(t)$ ($k = 1, \dots, I$)を次式により求めることである。

$$y_k(t) = \sum_{j=1}^J (w_{kj} * x_j)(t) \quad \dots (8)$$

時間領域での畳み込み混合は、周波数領域における複数の瞬時混合に変換することができる。すなわち、前記の式(7)及び式(8)は、それぞれ前記式(1)及び式(5)で表わされ、前述したように、 $W(\omega)$ は分離行列であり、ICA

を用いて $Y_k(\omega, m)$ と $Y_{k'}(\omega, m)$ が互いに独立となるように計算されたもの、つまり ICA の解である。

以上の周波数領域でのブラインド信号分離を行うに際し問題となるのは、パーミュテーションの問題とスケーリングの問題である。

- 5 前述したように分離行列 $W(\omega)$ は行の入れ替えを行っても独立成分分析の解となる。つまりある角周波数 ω において、 $W(\omega)$ が ICA の解だとし、複素数を要素とする任意の対角行列を $D(\omega)$ とし、任意のパーミュテーション行列（この行列を任意の行列の左から掛けた結果は、この任意の行列の行を入れ替えた行列となる）を $P(\omega)$ とした場合における $P(\omega) D(\omega) W(\omega)$ もまた ICA の解となる。これは、ICA が源信号間の統計的独立性のみを条件として源信号の分離を行うことに基づくものであり、この $D(\omega)$ によって与えられる解の自由度をスケーリングの自由度と呼び、 $P(\omega)$ によって与えられる解の自由度をパーミュテーションの自由度と呼ぶ。
- 10

- そのため、適切なブラインド信号分離を行うためには、全ての ω について、ICA の解から分離行列として適切な解 $W(\omega)$ を特定しなければならない。一般に、この適切な解 $W(\omega)$ の特定は、任意に求めた ICA の解に、適切な $D(\omega)$ や $P(\omega)$ を乗じ、その結果を適切な解 $W(\omega)$ とすることによって行われる。そして、全ての ω について、この $D(\omega)$ を適切に決める問題をスケーリングの問題と呼び、 $P(\omega)$ を適切に決める問題をパーミュテーションの問題と呼ぶ。
- 15
- また、パーミュテーションとは、 $\{1, 2, \dots, I\}$ から $\{1, 2, \dots, I\}$ への全単射な関数 $Z: \{1, 2, \dots, I\} \rightarrow \{1, 2, \dots, I\}$ であり、パーミュテーション行列と 1 対 1 対応する。
- 20

- スケーリングの自由度は、時間領域において周波数特性を変化させるフィルタの自由度に相当する。それゆえ、時間領域において歪のない分離信号を生成するためには、全ての ω について、 $D(\omega)$ を適切に決める必要がある。このスケーリングの問題は、例えば、 $D(\omega) = \text{diag}(W^{-1}(\omega))$ とすることで容易に解決することができる。 $\text{diag}(\alpha)$ は行列 α の対角化（対角要素の他は全ての要素を 0 とする）を表わす。つまり任意に求めた ICA の解 $W_0(\omega)$ の逆行列を求め、それを対角化した行列を $D(\omega)$ とし、 $D(\omega) W_0(\omega)$ を、適切な
- 25

分離行列 $W(\omega)$ として特定する。このことは既に知られている。例えば参考文献：K. Matsuoka and S. Nakashima, "Minimal Distortion Principle for Blind Source Separation", Proc. ICA 2001, pp. 722-727. に示されている。

一方、パーミュテーションの自由度のため、前記の式(5)の演算結果として、
5 例えば、ある角周波数 ω_1 については分離信号 $Y_1(\omega_1, m)$ が源信号 $S_1(\omega_1, m)$ の推定値として出力され、別の角周波数 ω_2 については分離信号 $Y_1(\omega_2, m)$ が源信号 $S_2(\omega_2, m)$ の推定値として出力されることもありうる。このような場合、時間領域の出力信号 $y_1(t)$ の中に、時間領域の源信号 $s_1(t)$ の成分と $s_2(t)$ の成分とが混在してしまい、分離信号を正しく生成することができない。
10 そのため、時間領域における出力信号 $y_1(t)$ が正しく源信号 $s_1(t)$ の推定値となるためには、全ての ω について、 $Y_1(\omega, m)$ が $S_1(\omega, m)$ の推定値となるように $P(\omega)$ を適切に決める必要がある。

従来のパーミュテーション問題の代表的な解法として、前記文献1に示す信号の到来方向を推定する方法がある。つまり、図2を参照して説明したように、各
15 周波数における分離行列 $W(\omega)$ の各行と対応する指向特性を求める（図2では $f = 3156 \text{ Hz}$ の指向特性のみを示している）。これら各周波数の指向特性において例えば分離行列 $W(\omega)$ の1行目が与える指向特性のゲイン最小値が 55° で、2行目が与える指向特性のゲイン最小値が 121° になるようにする。つまりある角周波数 ω_n ではその分離行列 $W(\omega_n)$ の1行目が与える指向特性のゲイン最小値が 121° で、2行目が与える指向特性のゲイン最小値が 55° であれば、その分離行列 $W(\omega_n)$ の1行目と2行目とを入れ替える。つまりこの入れ替えを行うパーミュテーション行列 $P(\omega_n)$ を $W(\omega_n)$ にその左から掛算する。
20

このパーミュテーション問題の解法は先にも述べたように指向特性のゲイン最小値を求める操作に多くの計算を要し、しかも信号源の数 I が3以上では全角周
25 波数の $W(\omega)$ について適当に並べ替えを行ってみるという試行錯誤が必要となる。更に図3を参照して説明したように $W(\omega)$ のある行がある方向の信号 $S_i(\omega, m)$ を取り出している場合は、その $W(\omega)$ の他の行は全てその方向の信号 $S_i(\omega, m)$ を抑圧する状態に必ずしもならない。

また指向特性のゲインが低い方向を探索して推定する信号到来方向の推定精度

は信号源の位置によって異なり、特に一対のセンサ 1_j と $1_{j'}$ を結んだ直線（以下、センサペア軸という）に信号到来方向が近い場合に誤差が大きくなる。このことを実験により示す。図 4 A に示すように、2つのセンサ 1 0 1, 1 0 2 としてマイクロホンを距離 2. 8 3 c m 離して配置し、センサ 1 0 1 と 1 0 2 の中点（原点）から一定の距離（約 1 5 0 c m）離れ、かつ角度間隔が 20° 離れた2つの信号源 1 1 1, 1 1 2 として音源を設け、センサ 1 0 1 からセンサ 1 0 2 を見た方向を基準（ 0° ）として、原点からみた信号源 1 1 1 の角度 θ が 10° から 150° となるまで音源 1 1 1 と 1 1 2 を前記一定距離及び角度間隔を保持した状態で移動させた。

10 このように音源 1 1 1, 1 1 2 を移動させながら行ったブラインド信号分離結果を図 4 B に例示する。図 4 B の縦軸は、信号対妨害音比（Signal to Interference Ratio）を示しており、分離音中に含まれる目的信号及び妨害信号を用いて、

$$SIR = 10 \log_{10} (\text{目的信号のパワー} / \text{妨害信号のパワー}) \text{ (dB)}$$

15 のように計算したものである。また、図 4 B の横軸は、原点からみた音源 1 1 1 の角度 θ を表し、実線はこの実験結果を示しており、点線はパーミュテーションに正解を与えたときの SIR を示している。

20 この図より信号源 1 1 1 が、センサペア軸に近い方向（ 0° 或いは 180° 付近）に近づくと、実験結果の SIR はパーミュテーションに正解を与えたときの SIR に比べ大きく低下していることがわかる。このことは信号源 1 1 1 の方向がセンサペア軸方向と近いとパーミュテーションが誤っていることに基づくと考えられる。

25 以上述べたように独立成分分析を用いて分離行列を求め、その各行から指向特性パターンを求めて、その利得が低い方向探索により、信号源の方向（到来信号方向）を求め、更にこれを利用してブラインド信号分離を行う場合は、前記指向特性パターンを求めて、利得が低い方向を探索するために多くの計算時間を必要とした。

この発明の目的は独立成分分析により分離行列を求めて信号源の位置情報を推定するための計算時間が短い位置情報推定装置、その方法及びプログラムを提供することにある。

発明の開示

この発明によれば周波数領域の分離行列 $W(\omega_1), \dots, W(\omega_N)$ の逆行列 ($I < J$ の場合は擬似逆行列) を計算してスケーリングとパーミュテーションの自由度を含む混合行列 $A(\omega_1), \dots, A(\omega_N)$ の推定値 $H(\omega_1), \dots, H(\omega_N)$ を生成し、これらの周波数ごとの $H(\omega_n)$ ($n = 1, \dots, N$) について各列ごとにその2つの要素 $H_{ji}(\omega_n)$ と $H_{j'i}(\omega_n)$ (j, j' はセンサを表すパラメータ、 i は信号源を表すパラメータ) の比から、信号源 i の位置情報の一つのパラメータ、例えば信号源が存在する円錐面あるいは曲面を計算する。

このように要素比に基づき表された計算式を演算すればよく、分離された信号の指向性パターンを求め、更にその極小値角度の探索を行う場合より少ない計算量で済む。また要素比をとるため、前述したスケーリングの自由度による影響がなくなる。

図面の簡単な説明

図1はセンサアレーと到来信号の各センサへの到来時間差の関係を説明するための図である。

図2は2音源混合信号に対し、ICAにより計算した分離行列の各行のゲイン指向特性を示す図である。

図3は3音源混合信号に対し、ICAにより計算した分離行列の各行のゲイン指向特性を示す図である。

図4Aは予備実験に用いたセンサと信号源の関係を説明するための図である。

図4Bは前記予備実験の結果を示す図である。

図4Cは推定角度とその誤差及び偏角誤差との関係を示す図である。

図5はこの発明を信号到来方向の推定に適用した第1実施形態の機能構成例を示すブロック図である。

図6は第1実施形態の処理手順の例を示す流れ図である。

図7は図5中の角度計算部の具体的機能構成例を示すブロック図である。

図8は図6中のステップS4の具体的処理手順の例を示す流れ図である。

図9はこの第1実施形態により方向推定した実験結果を示す図である。

図10Aは音源が2個、マイクロホンが3個の場合に第1実施形態により方向推定した実験結果を示す図である。

図10Bは図10Aについての実験と同一条件でMUSIC法により方向推定した実験結果を示す図である。

5 図11Aは音源が2個、マイクが3個の場合に第1実施形態により方向推定した実験結果を示す図である。

図11Bは図11Aについての実験と同一条件でMUSIC法により方向推定した実験結果を示す図である。

10 図12はこの発明をブラインド信号分離に適用した第2実施形態の機能構成例を示すブロック図である。

図13は第2実施形態の処理手順の例を示す流れ図である。

図14は図13中のステップS14の具体的処理手順の例を示すブロック図である。

図15は複数円錐面の共通直線方向を説明するための図である。

15 図16は図12中の到来方向決定部16の具体的機能構成の他の例を示すブロック図である。

図17はこの発明をブラインド信号分離に適用した第3実施形態の機能構成例を示すブロック図である。

図18は第3実施形態の処理手順の例を示す流れ図である。

20 図19は図18中のステップS35の具体的処理手順の例を示す流れ図である。

図20はセンサ配置と信号源位置と推定曲面との関係を説明するための図である。

図21は推定球面の例を示す図である。

図22は実験に用いた室とマイクロホン配置と音源との関係を示す図である。

25 図23は小間隔マイクロホン対を用いた推定方向のヒストグラムである。

図24はその周波数に対する推定方向の分布を示す図である。

図25は音源 2_4 及び 2_5 に対する推定球面の半径の周波数に対する分布を示す図である。

図26は各方法での実験結果を示す図である。

図 2 7 はこの発明の第 4 実施形態の要部の機能構成例を示すブロック図である。

図 2 8 はこの発明をブラインド信号分離に適用した第 5 実施形態の処理手順の例を示す流れ図である。

図 2 9 は第 5 実施形態に対する実験結果を示す図である。

5 図 3 0 A は複数の円錐面の共通直線方向を求めて分離行列のパーミュテーションを解決する処理手順の要部を示す流れ図である。

図 3 0 B は円錐面の推定と球面の推定を利用して分離行列のパーミュテーションを解決する処理手順の要部を示す流れ図である。

10 図 3 0 C は円錐面の推定と球面の推定を利用して分離行列のパーミュテーションを解決する他の処理手順の要部を示す流れ図である。

発明を実施するための最良の形態

まず信号源の位置情報として方向情報を推定する場合にこの発明を適用した実施形態を説明する。なお以下の説明において同一又は対応するものについて図面
15 中に同一の参照番号を付けて、重複説明を省略する。

[第 1 実施形態]

この第 1 実施形態は信号源の方向、つまりその信号源から放射された源信号の到来方向を求める。

20 図 5 に第 1 実施形態の機能構成図を、図 6 にその処理手順の一部の流れ図をそれぞれ示す。

信号源の数 I 以上の個数である J 個のセンサ $1_1, 1_2, \dots, 1_J$ が、例えば図 1 に示したように配列されている。隣接センサの間隔は通常は、源信号の最も短い波長の $1/2$ 以下である。これらセンサ 1_j ($j = 1, 2, \dots, J$) で観測された信号 $x_j(t)$ はそれぞれ周波数領域変換部 1_1j において、例えば短時間フーリエ変換により周波数領域信号 $X_j(\omega, m)$ に変換される(図 6、ステップ S 1)。
25 これら周波数領域信号 $X_j(\omega, m)$ に対する各角周波数 ω_n ごとの分離行列 $W(\omega_n)$ ($n = 1, 2, \dots, N$) が分離行列算出部 1 2 において独立成分分析により算出される(図 6、ステップ S 2)。

$$W(\omega) = (W(\omega_1), W(\omega_2), \dots, W(\omega_N))$$

この各周波数ごとの分離行列 $W(\omega_n)$ の逆行列が逆行列算出部 13 で算出され逆行列 $H(\omega_n)$ が求まる (図 6、ステップ S3)。

$$H(\omega) = (H(\omega_1), H(\omega_2), \dots, H(\omega_n))$$

なおこの逆行列の計算は $J > I$ の場合は疑似逆行列を計算することになる。疑似逆行列としては例えば Moore-Penrose 型一般逆行列が用いられる。

この実施形態においては $H(\omega)$ 中の少なくとも 1 つの周波数の逆行列 $H(\omega_n)$ の各列 i の 2 つの要素 $H_{ji}(\omega_n)$ と $H_{j'i}(\omega_n)$ との比の偏角から方向情報、つまり源信号の到来方向が角度計算部 14 で計算される (図 6、ステップ S4)。この角度計算部 14 の具体的機能構成例と処理手順例を図 7 及び図 8 を参照して説明する。選択部 14a により角周波数 ω_n の逆行列 $H(\omega_n)$ 中の未選択の一つの列 i が選択され (図 8、ステップ S4a)、その i 列目から 2 つの要素 $H_{ji}(\omega_n)$ と $H_{j'i}(\omega_n)$ が選択される (図 8、ステップ S4b)。

偏角計算部 14b で、選択された要素の比の偏角 $\arg[H_{ji}(\omega_n)/H_{j'i}(\omega_n)]$ が計算され、また間隔計算部 14c で、センサ情報格納部 15 内のセンサ 1_j と $1_{j'}$ の位置情報 d_j と $d_{j'}$ が取り出され、これらの差からセンサ 1_j と $1_{j'}$ の間隔 $d_j - d_{j'}$ が計算される (図 8、ステップ S4c)。位相回転計算部 14d で、間隔 $d_j - d_{j'}$ と、角周波数 ω_n での単位距離当りの信号の位相回転量 ω_n/c (c は源信号の速度) との積が計算されて間隔 $d_j - d_{j'}$ での信号の位相回転量が求められ、この位相回転量により偏角 $\arg[H_{ji}(\omega_n)/H_{j'i}(\omega_n)]$ が除算部 14e で割算される (図 8、ステップ S4d)。なお単位距離当たりの位相回転量 ω/c は例えば $f = 680 \text{ Hz}$ の音波 (速度 $c = 340 \text{ m/s}$) では、 1 m 当たり $2\pi \cdot 2$ の位相が回転することになる。

この除算部 14e の割算結果 $G_i(\omega_n)$ の絶対値が 1 以下か否かが判定部 14f で判定され (図 8、ステップ S4e)、1 以下であれば $G_i(\omega_n)$ の逆余弦 $\theta_i(\omega_n) = \cos^{-1} G_i(\omega_n)$ が逆余弦計算部 14g で計算される (図 8、ステップ S4f)。つまり角度計算部では次の計算が行われる。

$$G_i(\omega_n) = \arg[H_{ji}(\omega_n)/H_{j'i}(\omega_n)] / (\omega(d_j - d_{j'})/c)$$

$$\theta_i(\omega_n) = \cos^{-1} G_i(\omega) \quad : \quad |G_i(\omega_n)| \leq 1 \text{ に対して、} \dots (9)$$

ステップ S4e で $|G_i(\omega_n)|$ が 1 以下でなければ角度 $\theta_i(\omega_n)$ が虚数にな

るので、別の組み合わせを選択するため、判定部 1 4 f で選択した i 列目のすべての要素の組み合わせを選択したか判定され（図 8、ステップ S 4 g）、選択していない組み合わせがあればステップ S 4 b に戻り、全ての組み合わせを選択していれば、判定部 1 4 f ですべての列を選択したか判定され（図 8、ステップ S 4 h）、選択
5 していない列があればステップ S 4 a に戻り、全ての列を選択していれば角度計算処理を終了する。なお図 7 中の間隔計算部 1 4 c は各周波数の角度計算部 1 4 に対して共通に用いられる。

角度計算部 1 4 から $H(\omega)$ 中の選択した角周波数 ω_n の逆行列 $H(\omega_n)$ における各列と対応して、その選択順に、もし第 1 列目から順次選択すればその順に
10 式 (7) の計算結果、つまり I 個の信号源の方向（信号到来方向） $\Theta(\omega_n) = (\theta_1(\omega_n), \theta_2(\omega_n), \dots, \theta_I(\omega_n))$ が出力される。これら $\theta_1(\omega_n), \theta_2(\omega_n), \dots, \theta_I(\omega_n)$ は各源信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_I(t)$ の到来方向（信号源 1, 2, ..., I の方向）のいずれかの 1 つと対応する。

この実施形態において信号到来方向が推定できるしくみを以下に説明する。独立成分分析（ICA）により分離が達成されていれば、ICA により算出した分離行列 $W(\omega)$ と真の混合行列 $A(\omega)$ とは $P(\omega) D(\omega) W(\omega) A(\omega) = I$ の関係にある。ここで、 $D(\omega)$ はスケーリングの自由度を示す対角行列、 $P(\omega)$ はパーミュテーションの自由度を示すパーミュテーション行列、 I は単位行列である。ICA を用いても、混合行列 $A(\omega)$ そのものは一般には算出で
15 きない。しかし、 $W(\omega)$ の逆行列 $H(\omega) = W^{-1}(\omega) = A(\omega) P(\omega) D(\omega)$ を算出すれば、スケーリングとパーミュテーションの自由度を含む混合行列の推定値が得られる。すなわち、逆行列 $H(\omega)$ は、混合行列 $A(\omega)$ の列を $P(\omega)$ により並べ替え、さらに各列にそれぞれ $D(\omega)$ の対角要素を掛け合わせたものになる。

25 この実施形態では、逆行列 $H(\omega)$ の同じ列 i から 2 つの要素 $H_{ji}(\omega)$ と $H_{j'i}(\omega)$ を取り出してそれらの比 $H_{ji}(\omega) / H_{j'i}(\omega)$ を求めることで、算出できない $D(\omega)$ によるスケーリングの自由度を取り除く。すなわち、

$$\frac{H_{ji}(\omega)}{H_{j'i}(\omega)} = \frac{[A(\omega)P(\omega)D(\omega)]_{ji}}{[A(\omega)P(\omega)D(\omega)]_{j'i}} = \frac{A_{jz(i)}(\omega)}{A_{j'z(i)}(\omega)} \quad (21)$$

となる。ここで、Zはパーミュテーション行列P(ω)を右から掛けることに対応する順列である。逆行列H(ω)の全ての列iに対して式(21)に関わる操作を行うことで、P(ω)によるパーミュテーションZにかかわらず、全ての信号の到来方向が推定できる。

背景技術の説明では、混合行列A(ω)の要素を $A_{ji}(\omega) = \exp(j\omega c^{-1}d_j \cos \theta_i)$ とモデル化した。しかし、この実施形態では、分離行列W(ω)の逆行列H(ω)を用いて、スケーリングとパーミュテーションの自由度を含む混合行列A(ω)の推定値を算出しているので、この単純なモデルでは不十分である。そこで、振幅の減衰度 α_{ji} (実数)と原点における位相差 $\exp(j\phi_i)$ を用いて、 $A_{ji}(\omega) = \alpha_{ji} \exp(j\phi_i) \exp(j\omega c^{-1}d_j \cos \theta_i)$ とモデル化する。このモデルを用いて $A_{jz(i)}(\omega) / A_{j'z(i)}(\omega)$ を計算すると、式(21)の関係から、

$$\frac{H_{ji}(\omega)}{H_{j'i}(\omega)} = \frac{A_{jz(i)}(\omega)}{A_{j'z(i)}(\omega)} = \frac{\alpha_{jz(i)}}{\alpha_{j'z(i)}} \exp(j\omega c^{-1}(d_j - d_{j'}) \cos \theta_{z(i)}) \quad (22)$$

が得られる。その結果、上記の $G_i(\omega)$ は $G_i(\omega) = \arg [H_{ji}(\omega) / H_{j'i}(\omega)] / (\omega c^{-1}(d_j - d_{j'})) = \cos \theta_{z(i)}$ となり、 $|G_i(\omega)| \leq 1$ であれば $\theta_{z(i)} = \cos^{-1} G_i(\omega)$ が実数となり、到来方向を推定することができる。先に述べたように、パーミュテーションZの自由度により、I個の方向 $\Theta(\omega) = [\theta_{z(i)}(\omega), \dots, \theta_{z(I)}(\omega)]$ 全体を適当に並べ替えたものが、信号 s_1, \dots, s_I の方向に対応する。

H(ω)中の複数の周波数又は全ての周波数の各逆行列H(ω_n)(n=1, ..., N)について先に述べたように各列ごとに角度 $\theta_i(\omega_n)$ を求め、これらの全体により各到来方向を決定してもよい。つまり角度計算部14で推定された各周波数の到来方向は図5中のソート部32においてその角度ごとに分けられる(図6、ステップS5)。例えばそれぞれ方向(角度)の大きい順に並べられる。角周波数

ω_1 についての $\Theta(\omega_1)$ 中の各成分が大きい順に $(\theta_1(\omega_1), \theta_2(\omega_1), \dots, \theta_I(\omega_1))$ と並べ、 ω_2 についての $\Theta(\omega_2)$ 中の各成分が大きい順に $(\theta_1(\omega_2), \theta_2(\omega_2), \dots, \theta_I(\omega_2))$ と並べ、 \dots 、 ω_N についての $\Theta(\omega_N)$ 中の各成分が大きい順に $(\theta_1(\omega_N), \theta_2(\omega_N), \dots, \theta_I(\omega_N))$ と並べられる。このように大
 5 さい角度順に分別された角度は、大きい順が同一であっても周波数間でばらつきがある、つまり角度 $\theta_i(\omega_1), \theta_i(\omega_2), \dots, \theta_i(\omega_N)$ ($i = 1, \dots, I$) はばらついている。

よって統合部 33 で、分別角度 $\theta_i(\omega_1), \theta_i(\omega_2), \dots, \theta_i(\omega_N)$ ごとに 1 つの角度 θ_i に統合されて 1 つの角度 (到来方向) θ_i とされる (図 6、ステップ
 10 S6)。この統合の方法としては例えば分別角度 $(\theta_i(\omega_1), \theta_i(\omega_2), \dots, \theta_i(\omega_N))$ ごと平均値が統合角度 θ_i とされ、あるいは分別角度 $(\theta_i(\omega_1), \theta_i(\omega_2), \dots, \theta_i(\omega_N))$ ごとの最頻値や中央値などを統合角度 θ_i としてもよい。このように分別角度ごとに 1 つの角度に統合することにより、1 つのある周波数の逆行列 $H(\omega_n)$ からのみ到来方向を推定する場合より、正しく到来方向を推定する
 15 ことができる。

なお図 8 に示した角度 (方位) 計算推定処理において、その 1 つでも選択した列について、角度 $\theta_i(\omega_n)$ を求めることができなかった時は、そこでその逆行列 $H(\omega_n)$ に対する処理を終了し、他の周波数の逆行列 $H(\omega_n)$ に対する処理を行い、最初に全ての列について角度 (方向) を計算することができたら、その
 20 時の計算結果を推定 (方向) $\theta_1, \dots, \theta_I$ としてもよい。あるいは各周波数の逆行列 $H(\omega_n)$ 中で全ての列について角度計算ができた結果を角度ごとに分別し、統合してもよい。あるいは 1 つの列について角度 $\theta_i(\omega_n)$ を計算することができないものがあれば、その状態が最初に発生した時に、その後の処理を全て終了し、あらためて観測信号を求める処理からやりなおすことにより、推定結果の信
 25 頼性を高めるようにしてもよい。

この第 1 実施形態の実験例を述べる。残響時間が 190 ms の部屋に 3 つのマイクロホンを 56.6 mm 間隔で 1 列に配列し、その配列方向を基準として角度 48° 、 73° 、 119° の方向に 3 つの音源を配置した。これら音源からの音響信号の混合時間を 6 秒、観測信号の標本化周波数を 8 kHz、空間エイリアシ

ングが生じない最大周波数を 3 kHz、短時間フーリエ変換のフレームを 1024 サンプルとした。前述したようにして、各周波数ごとにそれぞれ計算した各角度を図 9 に、横軸を周波数、縦軸を方向として示す。図 9 中の \diamond , +, \square はそれぞれ 3 つの音源方向の推定計算値を示す。この結果を 3 つの角度範囲に分別し、
5 各分別された角度平均値は 45° , 74° , 123° となった。3 音源の方向を 3 つのマイクロホンで推定することは MUSIC 法ではできないが、この実施形態によれば可成り正しく各音源方向が推定されていることがわかる。

この実施形態の方法と MUSIC 法とを比較するため、音源方向を 48° と 119° と比較的大きく角差がある状態で 2 つの音源を配置した場合について同様に実験を行った。図 10 A にこの実施形態の方法により得られた結果を、図 10 B に MUSIC 法により得られた結果をそれぞれ示す。これらよりいずれの方法も、かなり正しく方向を推定していることがわかる。この実施形態による結果を 2 つの方向範囲で分別平均した結果は 45° , 123° であり、MUSIC 法はそれぞれ 45° , 122° である。次に、音源方向を 105° と 119° と方向
10 が比較的接近している状態で 2 つの音源を配置した場合について同様に実験を行った。この実施形態方法による結果及び MUSIC 法による結果を図 11 A 及び図 11 B にそれぞれ示す。MUSIC 法では大部分の周波数で音源方向の推定ができないが、この実施形態では大部分の周波数で角度計算を行うことができ、しかも、これらを角度範囲で分別して、それぞれ平均した値は 105° , 124°
15 であり、MUSIC 法は 94° , 128° でありこの実施形態による方向推定がかなり正しいことがわかる。

以上述べたようにこの実施形態によれば従来方法において、指向性パターンの利得が低い方向探索する場合と比較して、式 (9) に値を代入するだけで推定方向が求まるため計算時間がかなり短い。なお前述したように ICA により求めた分離行列 $W(\omega)$ はスケーリングの自由度及びパーミュテーションの自由度を含んでいるためこれらを解決した分離行列 $W'(\omega)$ の逆行列を計算し、つまり真の混合行列 $A(\omega)$ を計算し、その混合行列 $A(\omega)$ の各列について二つの要素の比を用いて到来方向を推定することが考えられるかもしれない。しかし、真の混合行列 $A(\omega)$ そのものを求めることは、例えば信号源の信号 $s_i(t)$ の平均パワ
25

一を1にするなどの制約を与えない限りできない。無線通信分野においては信号源に対しそのような制約を与えることができるかも知れないが、例えば信号源の信号 $s_i(t)$ が人間が直接発声した音声信号である場合は、そのような制約は実質的にはできない。一方この第1実施形態によれば、スケーリング及びパーミュテーションの自由度を含んでいる分離行列 $W(\omega)$ の逆行列 $H(\omega)$ の各列について二つの要素の比をとることによりスケーリングの自由度の問題を解決しておりどのような信号源に対しても適用でき、しかも前記両問題を解決した分離行列を計算する必要がなくそれだけ計算時間が短い。更に前述したように、各周波数について求めた推定方向を予め決めた順に分別すればパーミュテーションの問題も簡単に解決できる。センサの数 J と同数であっても各信号源の方向を推定することができる。また音源方向が比較的接近していてもかなり正しく推定することができる。

[第2実施形態]

この第2実施形態は信号源の一つの位置情報として方向情報を求めるものであり、かつ少なくとも2次元に配置された少なくとも3個のセンサを用いて、信号源がいずれの方向に位置していても方向を推定でき、従ってブラインド信号分離におけるパーミュテーションの問題も比較的簡単に解決するものである。つまり方向情報に基づく円錐面を推定し、複数の円錐面の共通直線を推定して、方向情報を決定する。

この第2実施形態をブラインド信号分離装置に適用した機能構成を図12に、その処理手順を図13に示す。例えば4個のセンサ $1_1, 1_2, 1_3, 1_4$ が同一円上で等間隔に配置され、そのいずれの2つのセンサの間隔も、源信号の最短波長の $1/2$ 以下とされる。以下の説明はセンサの数は J 個であり、 $J \geq 3$ として行う。

(第1実施形態と同様に各センサ j ($j=1, \dots, J$) で観測された観測信号 $x_j(t)$ は、それぞれ周波数領域変換部11で例えば、短時間フーリエ変換によって、周波数領域の信号 $X_j(\omega, m)$ にそれぞれ変換される(ステップS11)。

これら周波数領域の信号 $X_j(\omega, m)$ から、分離行列算出部12で、独立成分分析により、各周波数ごとの分離行列

$$W(\omega) = \begin{bmatrix} W_{11}(\omega) & \cdots & W_{1J}(\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ W_{I1}(\omega) & \cdots & W_{IJ}(\omega) \end{bmatrix}$$

が算出される（ステップS12）。

逆行列算出部13でこれら周波数ごとの各分離行列 $W(\omega)$ の逆行列 $H(\omega)$ がそれぞれ算出される（ステップS13）。

$$H(\omega) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & \cdots & H_{1I}(\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ H_{J1}(\omega) & \cdots & H_{JI}(\omega) \end{bmatrix}$$

この第2実施形態では、円錐面推定部14において、周波数ごとの各逆行列 $H(\omega)$ における各列ごとに異なる複数の要素対について各要素の比からこれら要素と対応する二つのセンサのセンサペア軸を中心軸とし、何れかの信号源が存在する円錐面、つまり一つの混合行列 $H(\omega)$ の各列ごとに複数の円錐面がそれぞれ推定される（ステップS14）。

円錐面推定部14の機能構成は図15中の角度計算部14とほぼ同様であり、その処理手順も図8の手順と似ている。円錐面推定部14において行われる一つの周波数の逆行列 $H(\omega)$ に対するステップS14の処理の具体例を図14を参照して説明する。

まず、例えば、円錐面推定部14内のレジスタ内に格納されている制御パラメータ i と p を0に初期化する（ステップS20）。ここで、 i は各信号源の番号と対応し、 p は i ごとの推定済み円錐面の個数である。

i を+1し（ステップS21）、 g を+1し（ステップS22）、制御パラメータ j, j' はそれぞれ互いに異なる j 以下の自然数を、例えばランダムに選択する（ステップS23）。この制御パラメータ j, j' の組は、同一の i に対しては一

度選択された j, j' の組み合わせの選択は行わないようにする。すなわち、 $j \neq j'$ であり、また、例えば、 $i = 1$ について、一度 $(j, j') = (1, 2)$ が選択されると、 $i = 1$ については、この処理が終了するまで、再びステップ S 2 3 において $(j, j') = (1, 2)$ という選択は行われたいものとする。(また、この

5 選択は、選択する j, j' によって特定されるセンサペア軸(センサ j とセンサ j' とを通る直線)が、このルーチン処理においてそれ以前に選択された j, j' によって特定されるセンサペア軸と同一直線上に配置されないように行われることが望ましい。これにより、円錐面推定部 1 4 は、一定の誤差範囲内で中心軸が重ならない複数の円錐面を推定することになる。なお、各センサペア軸が同一直線上

10 となるか否かの判断は、例えば、センサ情報格納部 1 5 に各センサの位置を示すベクトルを格納しておき、ここから各センサの位置を示すベクトルの情報を抽出して行う。)

次に、センサ情報格納部 1 5 から、ステップ S 2 3 で選択したパラメータ j に対応する j 番目のセンサ j の位置を示すベクトル d_j と、変数 j' に対応する j'

15 番目のセンサ j' の位置を示すベクトル $d_{j'}$ とを抽出する(ステップ S 2 4)。また、混合行列 $H(\omega)$ から、 j 行 i 列要素 $H_{ji}(\omega)$ と、 j' 行 i 列要素 $H_{j'i}(\omega)$ とを選択して抽出する(ステップ S 2 5)。以上の処理は図 7 中の選択部 1 4 a により行われる。従って、 i, p, j, j' や選択した j, j' などを格納するレジスタも選択部 1 4 a に設けられることになる。

20 抽出したこれらの情報を用い、次式(9')を演算する(ステップ 2 6)。

$$\hat{\theta}_{i,jj'}(\omega) = \cos^{-1} \frac{\arg[H_{ji}(\omega)/H_{j'i}(\omega)]}{\omega c^{-1} \|d_j - d_{j'}\|} \quad (9')$$

ここで $\|d_j - d_{j'}\|$ はセンサ 1_j と $1_{j'}$ との間隔(距離)である。この第 2 実施形態においては複数のセンサが 2 次元又は 3 次元に配置されているため各センサの位置情報は例えば図 1 2 中のセンサ $1_1 \sim 1_4$ が配置されている円の中心を原点とする 2 又は 3 要素の座標ベクトルで表わされる。つまり式(9)はセンサが 1 次元に配置され、信号到来方向の角度が 2 次元の場合であるが、この式(9')はセ

25

ンサが2次元あるいは3次元に配置されていてもよく信号到来方向の角度が3次元空間でもよい場合に拡張されたものである。従って式(9')は式(9)を包含する。この式(9')により推定された角度 $\theta_{i,j,j'}(\omega)$ 及びその i, j, j' を円錐面情報として円錐面推定部14内のレジスタ(メモリ)に一時記録する(ステップS27)。なお図12中に破線で示すように各周波数に対する間隔計算部14cは共通に用いられる。また式(9)で演算した角度 $\theta_i(\omega)$ は三次元空間においてセンサペア軸(センサ1_jと1_{j'}とを結ぶ直線)に対する角度が $\theta_i(\omega)$ となる直線の無数の集合、つまり円錐面に信号源 i が存在することを推定していることになる。この拡張された式(9')の演算結果を単なる $\theta_i(\omega)$ ではなく $\theta_{i,j,j'}(\omega)$ と表わした。ステップS26で行う演算は図7中の偏角計算部14b、間隔計算部14c、位相回転計算部14d、除算部14e、判定部14f及び逆余弦計算部14gにより、図8中のステップS4c、S4d、S4e及びS4fの処理により行う。

次に、 $p = P$ であるか否かを判断する(ステップS28)。この P は、 i ごとに推定すべき円錐面の個数であり、このステップでは、その i について円錐面を P 個推定したか否かを判断する。 $p = P$ でなければステップS22に戻り、 $p = P$ であれば、 $i = I$ であるか否かを判断する(ステップS29)。すなわち、すべての i について円錐面の推定が終了したか否かを判断し、 $i = I$ でなければステップS21に戻り、 $i = I$ であれば処理を終了する(ステップS14の具体例の説明終了。)。第1実施形態では選択した i について角度 $\theta_i(\omega)$ を1つ推定すれば次の i についての角度推定に移るがこの第2実施形態では各 i ごとに複数 P 個の組の角度(円錐面) $\theta_{i,j,j'}(\omega)$ を推定する。ステップS28及びS29の処理は図7中の判定部14fで行われる。

図12中の到来方向決定部16で、円錐面推定部14で推定された複数の円錐面の情報(この例では、 $i, j, j', \theta_{i,j,j'}(\omega)$)から源信号の到来方向 $u_i(\omega) = (\text{方位角 } \theta_i(\omega), \text{ 仰角 } \phi_i(\omega))$ ($i = 1, \dots, I$) が決定される(図12、ステップS15)。具体的には、例えば、 i について推定された複数の円錐面のうち、互いに線接触しているとみなされる共通直線の方角を、信号源 i に対応する信号の到来方向 $u_i(\omega)$ として算出する。

この信号の到来方向 $u_i(\omega)$ の推定方法を図 15 を参照して説明する。

センサ 1_1 と 1_2 の配列方向と直角方向にセンサ 1_3 が配され、センサ 1_1 と 1_2 間、センサ 1_2 と 1_3 間の各間隔は同一とされている。 $i = 2$ の信号源 2_2 に対し、センサ 1_1 及び 1_2 によりセンサペア軸 3_{12} を中心軸とする円錐面 $4_{12}(\theta_{2,12}^{\wedge}(\omega))$ が、センサ 1_2 と 1_3 によりセンサペア軸 3_{23} を中心軸とする円錐面 $4_{23}(\theta_{2,23}^{\wedge}(\omega))$ が、センサ 1_1 と 1_3 によりセンサペア軸 3_{13} を中心軸とする円錐面 $4_{13}(\theta_{2,13}^{\wedge}(\omega))$ がそれぞれ推定されている。これらのうち、円錐面 4_{12} と 4_{13} は、共通直線 5_2 で互いに線接触しているとみなされる。この共通直線 5_2 の方向 $u_2(\omega)$ が、信号源 2_2 から放射された信号の到来方向 u_2 つまり信号源 2_2 の方向と決定する。なお円錐面 4_{23} も平行移動すれば円錐面 4_{12} 、 4_{13} とほぼ線接触するが、後述する第 4 実施形態により円錐面 4_{23} は廃棄される。

図 12 中の到来方向決定部 16 におけるこの共通直線 5_i の方向 $\theta_i(\omega)$ を決定するための具体的計算方法の例を説明する。角周波数 ω に対して信号源 2_i が存在すると推定された複数の円錐面を $4_{jj'}(1), \dots, 4_{jj'}(P)$ とし、これら円錐面 $4_{jj'}(p)$ ($p = 1, \dots, P$) の推定に用いられた 1 対のセンサの位置情報を $d_j(p)$ 、 $d_{j'}(p)$ とし、角周波数 ω について推定された円錐面 $4_{jj'}(p)$ と対応する角度を $\theta_{jj'}^{\wedge}(\omega, p)$ とし、円錐面 $4_{jj'}(p)$ を表わすベクトルを u とする。

正規化軸ベクトル計算部 16a で前記各一对のセンサの位置間を結ぶ軸ベクトル $(d_j(p) - d_{j'}(p))$ をそれぞれ長さ 1 に正規化する。つまり

$$v_p = (d_j(p) - d_{j'}(p)) / \|d_j(p) - d_{j'}(p)\|$$

をそれぞれ演算する。この v_p と円錐面ベクトルの内積はこれらベクトルのなす角度の余弦とする。つまり

$$v_p^T \cdot u / \|u\| = \cos \theta_{jj'}^{\wedge}(\omega, p)$$

関係が成立する。知りたいのは共通直線 5_i の方向のみであるから円錐面ベクトル u は単位ベクトル、つまり $\|u\| = 1$ とする。全ての円錐面と共通する直線の方法を求めるには

$$V = (v_1 \dots v_P)^T, c^{\wedge}(\omega) = (\cos \theta_{jj'}^{\wedge}(\omega, 1) \dots \cos \theta_{jj'}^{\wedge}(\omega, P))^T$$

として次式の連立方程式を u について解けば良い。

$$V u = \hat{c}(\omega) \quad (\|u\| = 1)$$

一般にはこの連立方程式は解が存在しないか、もしくは一意には決まらない。そこで $\|Vu - \hat{c}(\omega)\|$ を最小化する u を求めて前記連立方程式の解、つまり共通直線 5_i の方向 $u_i(\omega)$ とする。この誤差を最小化する u を求める計算が演算部 16b で行われる。この方向 $u_i(\omega)$ は 3 次元での方向であるから、極座標表示により方位角 $\theta_i(\omega)$ 及び仰角 $\phi_i(\omega)$ が求まることになる。

もっと計算を簡便にするには次のようにしてもよい。図 16 に示すように正規化軸ベクトル計算部 16a で円錐面推定に用いた各センサ対についての正規化軸ベクトル v_p ($p = 1, \dots, P$) を求め、逆行列計算部 16c で $V = (v_1, \dots, v_P)^T$ の Moore-Penrose 型一般逆行列 V^+ を計算し、この V^+ と推定円錐面と対応する余弦ベクトル $\hat{c}(\omega) = (\cos \theta_{jj'}(\omega, 1) \dots \cos \theta_{jj'}(\omega, P))^T$ とを用いて最小ノルムな最小 2 乗誤差解を求め、大きさを正規化して近似解としてもよい。つまり演算部 16d で

$$u_i(\omega) = V^+ \hat{c}(\omega) / \|V^+ \hat{c}(\omega)\|$$

を計算する。

このようにして複数の推定円錐面の共通直線とみなされる直線の方が各周波数ごとに、かつ各信号源ごとに求められる。

図 12 中のパーミュテーション解決部 17 は、到来方向決定部 16 で決定された到来方向 $u_i = (\theta_i, \phi_i)$ を用いて、分離行列算出部 12 で算出された分離行列 $W(\omega)$ の行の並び替えを行ってパーミュテーション問題が解決された分離行列を生成する。

パーミュテーション解決部 17 で行われる具体例としては、到来方位角 θ_i について以下のように並べ替えを行い、解決できなかった列について同様に到来仰角 ϕ_i による並べ替えを行う。つまり算出決定された到来方位角 $\theta_i(\omega)$ がどの周波数においても既定の順序、例えば、 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_I$ が昇順となるように逆行列 $H(\omega)$ の列を入れ替え、入れ替えができなかった列について仰角 ϕ_i がどの周波数でも昇順になるように逆行列 $H(\omega)$ の列を入れ替える並替行列が並替行列生成部 17a で生成され、その並替行列の逆行列 $P(\omega)$ が逆行列生成部 17b で生成され、並替部 17c でその逆行列 $P(\omega)$ が、分離行列 $W(\omega)$ に左から掛

算される。並替行列生成部及び逆行列生成部 17b はパーミュテーション行列生成部を構成している。

並替行列生成部 17a での処理を具体的に述べる。この例では逆行列 $H(\omega)$ の第 1 列目で $(\theta_1(\omega), \phi_1(\omega))$ が、第 2 列目で $(\theta_2(\omega), \phi_2(\omega))$ が、
 5 …、第 I 列目で $(\theta_I(\omega), \phi_I(\omega))$ がそれぞれ式 (9') に基づき計算されたとする。いま到来方向決定部 161 から入力された到来方向を、前記昇順に並べたものと区別するために θ および ϕ の各添字にダッシュ「'」を付けて、 $(\theta_{1'}(\omega), \phi_{1'}(\omega)), (\theta_{2'}(\omega), \phi_{2'}(\omega)), \dots, (\theta_{I'}(\omega), \phi_{I'}(\omega))$ と表わし、これらを例えばまず $\theta_{i'}(\omega)$ について昇順に並べた時に、例えば $(\theta_{3'}(\omega), \phi_{3'}(\omega)) > (\theta_{I'}(\omega), \phi_{I'}(\omega)) > (\theta_{2'}(\omega), \phi_{2'}(\omega)) > \dots$
 10 …であれば、逆行列 $H(\omega)$ の 3 列目を 1 列目に、I 列目を 2 列目に、2 列目を 3 列目になるように移動し、残りの列も同様に移動し、 $\theta_{i'}(\omega)$ が同一のものについては $\phi_{i'}(\omega)$ が昇順になるように列を移動する。そのような列の移動並べ替えを行う並替行列を作る。このような並べ替えを行う行列を作ることは従来からよく行われていることである。このようにして全ての周波数について得られた到来方向 $(\theta_1(\omega), \phi_1(\omega)), \dots, (\theta_I(\omega), \phi_I(\omega))$ を用いて、並替行列が作られ、更にその逆行列つまりパーミュテーション行列 $P(\omega)$ が算出される (図 13、ステップ S16)。

この算出したパーミュテーション行列 $P(\omega)$ が並替部 (17c) で分離行列
 20 $W(\omega)$ の左から掛けられ、その結果 $W'(\omega) = P(\omega)W(\omega)$ がパーミュテーション問題が解決された分離行列として出力される (ステップ S17)。つまりこの分離行列 $W'(\omega)$ はいずれの周波数のものでも、1 行目は信号源 2_1 の信号を分離する要素、2 行目は信号源 2_2 の信号を分離する要素、以下同様に同一行の要素は同一信号源からの信号を分離する要素となる。

25 分離行列 $W'(\omega)$ は、時間領域変換部 18 で、例えば、逆フーリエ変換によって、時間領域の分離フィルタ係数群

$$\begin{matrix} W_{11} & \cdots & W_{1J} \\ \vdots & & \vdots \\ W_{I1} & \cdots & W_{IJ} \end{matrix}$$

に変換され、これら分離フィルタ係数群は信号分離部 19 に設定される。

信号分離部 19 は、各センサからの観測信号 $x_1(t), \dots, x_J(t)$ と分離フ
 5 イルタ係数群とにより式 (8) の演算を行い分離信号 $y_1(t), \dots, y_I(t)$ を
 出力する。

図 12 中に破線で示すように、パーミュテーション解決部 17 よりの並替えさ
 れた分離行列 $W'(\omega)$ と周波数領域変換部 11 よりの周波数領域観測信号 $X(\omega,$
 $m)$ とにより式 (5) の演算を周波数領域分離信号生成部 19' で行い、その結
 10 果の周波数領域分離信号 $Y(\omega, m) = W'(\omega) X(\omega, m)$ を時間領域信号変
 換部 18' で時間領域信号 $y_1(t), \dots, y_I(t)$ を生成してもよい。また到来
 方向決定部 16 で決定された各周波数ごとの到来方向 $(\theta_1(\omega), \phi_1(\omega)), \dots,$
 $(\theta_I(\omega), \phi_I(\omega))$ を第 1 実施形態と同様に、つまり図 5 中のソート部 32
 で方向範囲ごとに分別し、各分別されたものごとの全周波数における到来方向を
 15 統合部 33 でそれぞれ統合してもよい。

以上説明したように、この実施形態においても指向特性パターンの低ゲイン方
 向を探索することなく、式 (9') の演算により円錐面情報 $(\hat{\theta}_{i,jj}(\omega), \hat{\phi}_{i,jj}(\omega))$
 $\hat{\theta}_{i,jj}(\omega), \hat{\phi}_{i,jj}(\omega))$ を推定しているため計算量が少ない。しかも同一信号源に対し、円錐面
 を複数推定してその共通直線から信号の到来方向を算出しているため、 0° から
 20 360° までのどの方向に信号源が存在しても、信号源 3_i の方向を一意に推定す
 ることができる。またその推定方向をパーミュテーション行列 $P(\omega)$ の決定に
 利用しているため、信号源の位置に関わらず、パーミュテーション問題を適切に
 解決することができる。

〔第 3 実施形態〕

25 第 3 実施形態は、位置情報として一对のセンサと一つの信号源との各距離の比
 に基づくその信号源が存在する曲面を用いる。第 1 及び第 2 実施形態においては

各信号源はセンサから遠方にあつて、信号源からの信号はセンサには平面波として到来することを想定して処理した。しかし信号源とセンサとの距離が比較的短かい場合はセンサには信号が球面波として到来する。このような点から混合行列 $A(\omega)$ の要素の比 $A_{ji}(\omega)/A_{j'i}(\omega)$ を球面波（近距離場）モデルによって解

5 釈すると、信号源 i の方向以外の情報を推定することができる。

すなわち、近距離場モデルを用いると、周波数応答 $A_{ji}(\omega)$ は以下のように表わせる。

$$A_{ji}(\omega) = (1 / \|q_i - d_j\|) \exp(j\omega c^{-1}(\|q_i - d_j\|))$$

ここで、 q_i は信号源 i の位置を示すベクトルである。

10 このように表現された周波数応答について混合行列の同一列の2つの要素比 $A_{ji}(\omega)/A_{j'i}(\omega)$ をとり、その絶対値を計算すると次式となる。

$$\|q_i - d_{j'}\| / \|q_i - d_j\| = |A_{ji}(\omega) / A_{j'i}(\omega)| \quad \cdots (10)$$

なお、 $|\beta|$ は β の絶対値を表わす。

この式(10)を満す q_i の点の無数の集合は信号源 i が存在する曲面を与え、

15 遠距離場（平面波）モデルを用いて推定された方向（又は円錐面）とあわせて用いることにより、センサから信号源 i までの距離を推定することができる。これにより、2つ以上の信号源が同一方向もしくは互いに近い方向にある場合であっても、距離が違っていれば、それらを区別でき、パーミュテーション問題を適切に解決することが可能となる。

20 この第3実施形態の例では、この信号源が存在する曲面を表わす位置情報と前記方向情報とを用いて分離行列に対するパーミュテーション問題を解決する。

第3実施形態の機能構成を図17に、その処理手順を図18にそれぞれ示す。センサは3個以上が2次元又は3次元に配置されるがこの実施形態においては例えば図20に示すようにセンサ 1_1 と 1_2 の間隔に対しセンサ 1_2 と 1_3 の間隔は1

25 0～20倍好ましくは1.5倍程度とされる。先の実施形態と同様、各観測信号 $x_1(t), \dots, x_J(t)$ は、それぞれ周波数領域の信号 $X_1(\omega, m), \dots, X_J(\omega, m)$ に変換され（ステップS11）、更に独立成分分析により、各周波数ごとに分離行列 $W(\omega)$ が算出される（ステップS12）、その各分離行列 $W(\omega)$ の逆行列として行列 $H(\omega)$ が算出される（ステップS13）。またこの例では第2実施

形態と同様に周波数ごとの逆行列 $H(\omega)$ の各列から選択した要素対を用い、円錐面が一つ好ましくは複数推定される（ステップ S 1 4）。この第 3 実施形態においては距離比算出部 3 1 において、周波数ごとの逆行列 $H(\omega)$ から列ごとに選択した要素対を用いその対応するセンサと 1 つの信号源 i との距離比、つまり式

5 (1 0) と式 (2 1) から次式 (1 0') を算出する（ステップ S 3 5）。

$$\|q_{z(i)} - d_{j'}\| / \|q_{z(i)} - d_j\| = |A_{jz(i)}(\omega) / A_{j'z(i)}(\omega)| = |H_{ji}(\omega) / H_{j'i}(\omega)| = DR_{i,jj'}(\omega) \quad \dots (1 0')$$

距離比算出部 3 1 において行われるステップ S 3 5 の処理の具体例を図 1 9 を参照して説明する。この処理は図 1 4 の処理の流れとほぼ同様である。パラメータ i を 0 に初期化し（ステップ S 2 0）、次に、 i を +1 し（ステップ S 2 1）、

10 パラメータ j, j' として J 以下の自然数を、例えばランダムに選択し $j \neq j'$ 、かつ 1 度選択した組は選択しない（ステップ S 2 3）。センサ j の位置ベクトル d_j と、センサ j' の位置ベクトル $d_{j'}$ とを抽出し（ステップ S 2 4）、逆行列 $H(\omega)$ の i 列目から、要素 $H_{ji}(\omega)$ と、 $H_{j'i}(\omega)$ とを、選択する（ステップ S 2 5）。

15 この実施形態ではこれら選択した 2 つの要素の比 $DR_{i,jj'}(\omega)$ を計算する（ステップ S 4 1）。次に、 $i = I$ であるか否かを判断し（ステップ S 2 9）。 $i = I$ でなければステップ S 2 1 に戻り、 $i = 2$ であれば処理を終了する。

距離比算出部 3 1 で算出された距離比情報 $DR_{i,jj'}(\omega)$ は、パーミュテーション解決部 1 7 に送られ、パーミュテーション解決部 1 7 は、到来方向決定部 1

20 6 で推定された方向情報 $u_i(\omega)$ と、距離比算出部 3 1 で算出された距離比情報 $DR_{i,jj'}(\omega)$ とを用いて、分離行列算出部 1 2 で算出された分離行列を行ってパーミュテーション問題を解決する。

$W(\omega)$ の行替えを行ってパーミュテーションの問題を解決する。例えば方向情報と距離比情報とから信号源 2_i の距離 $\|q_i(\omega)\|$ を距離推定部 1 7 d で計

25 算する（ステップ S 3 6）。

この距離 $\|q_i(\omega)\|$ の計算方法を図 2 0 を参照して説明する。信号源 2_1 及び 2_2 がセンサ $1_1, 1_2$ からみて同一方向 B にある。この場合センサ $1_1, 1_2$ 及び遠距離場モデルで推定される信号源 2_1 及び 2_2 の方向 u_1, u_2 は同一の直線を定める。一方、間隔が大きいセンサ $1_2, 1_3$ 及び近距離場モデルを用いて信号源 2_1

が存在すると曲面 6_1 は距離比

$$DR_{1,23}(\omega) = |H_{21}(\omega) / H_{31}(\omega)| = \|q_1 - d_3\| / \|q_1 - d_2\|$$

から推定でき、つまり $\|q_1(\omega)\|$ が推定できる。また信号源 2_2 が存在する曲面 6_2 は距離比

5
$$DR_{2,23}(\omega) = |H_{22}(\omega) / H_{32}(\omega)| = \|q_2 - d_3\| / \|q_2 - d_2\|$$

から推定でき、つまり $\|q_2(\omega)\|$ が推定できる。

信号源 2_1 の位置は、直線 $u_1 = u_2$ と、曲面 6_1 との共通部分上にあると推定でき、信号源 2_2 の位置は、直線 $u_1 = u_2$ と、曲面 6_2 との共通部分上にあると推定できる。例えば直線 $u_1 = u_2$ を表す式と曲面 6_1 及び 6_2 をそれぞれ表わす式との
10 連立方程式を解くことにより $\|q_1(\omega)\|$ 及び $\|q_2(\omega)\|$ を求めればよい。
このようにして信号源の方向が同一や近似する場合であっても、信号源位置を区別することができる。

パーミュテーション解決部 17 は、このようにして得られた各周波数ごとの信号源の距離 $\|q_i(\omega)\|$ が、所定の順序が例えば昇順になるように、分離行列 W
15 (ω) の行の入れ替えを行う。つまりこの入れ替えを行うためパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を算出する(ステップ S37)。そのパーミュテーション行列 $P(\omega)$ の算出は実施形態 2 中のパーミュテーション解決部で行ったパーミュテーション行列の算出と同様に行えばよい。算出したパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を分離行列 $W(\omega)$ の左から掛け、その結果 $W'(\omega) = P(\omega)W(\omega)$ を分離行列
20 として出力する(ステップ S38)。

出力された分離行列 $W'(\omega)$ は、時間領域変換部 18 に送られ、時間領域変換部 18 での信号分離に用いられる。

図 20 から理解されるように、センサ 1_2 と 1_3 についてみると、信号源 2_1 及びセンサ 1_2 間の距離と信号源 2_1 及びセンサ 1_3 間の距離との差が大きく、一方信号
25 源 2_2 及びセンサ 1_2 間の距離と信号源 2_2 及びセンサ 1_3 間の距離との差が小さい。
従って $DR_{1,23} = \|q_1 - d_3\| / \|q_1 - d_2\|$ と数値 1 との差の絶対値は比較的大きく、 $DR_{2,23} = \|q_2 - d_3\| / \|q_2 - d_2\|$ と数値 1 との差の絶対値は小さい。
センサ 1_2 と 1_3 の間隔が大きい程、距離比 $DR_{1,23}(\omega)$ と $DR_{2,23}(\omega)$ との差が大きくなる。このため間隔が大きいセンサ対、この例では 1_2 と 1_3 が設けられ

る。

パーミュテーション解決部 17 において、図 18 中のステップ S 37 中に括弧で示すように計算した距離比 $DR_{i, jj'}(\omega)$ を用いて、すべての周波数において逆行列 $H(\omega)$ の 1 列目, 2 列目, 3 列目, ..., I 列目の順に、求まる距離比 $DR_{i, jj'}(\omega)$ が昇順になるように並替行列を生成し、更に前記パーミュテーション行列 $P(\omega)$ を生成してもよい。この場合、図 17 中の距離推定部 17d は省略される。また到来方向決定部 16 で方向情報 $u_i(\omega)$ を計算できなかったり、逆行列 $H(\omega)$ の複数列について同一の $u_i(\omega)$ が計算された信号源 i とセンサ i, j' についてのみ、距離比 $DR_{i, jj'}(\omega)$ を計算し、これら自体により、あるいは更に求めた $\|q_i(\omega)\|$ により分離行列 $W(\omega)$ の行の入れ替えを行ってもよい。つまり、方向情報 $u_i(\omega)$ を用いて分離行列 $W(\omega)$ の行の入れ替えを行い、その後、 $u_i(\omega)$ によって入れ替えができなかった行については距離比 $DR_{i, jj'}(\omega)$ 又は $\|q_i(\omega)\|$ を用いて $W(\omega)$ の行の入れ替えを更に行ってもよい。実際には両入れ替えを同時に行うパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を生成する。

距離比 $DR_{i, jj'}(\omega)$ をまず求め、分離行列 $W(\omega)$ の行の入れ替えを行い、距離比 $DR_{i, jj'}(\omega)$ を求めることができなかったものについて方向情報 $u_i(\omega)$ を用いて分離行列 $W(\omega)$ の入れ替えを更に行ってもよい。この場合も両入れ替えを同時に行うパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を生成する。一般には $DR_{i, jj'}(\omega)$ より $u_i(\omega)$ の方が高い精度で得られるため、 $u_i(\omega)$ による入れ替えを主とし、できないものについて $DR_{i, jj'}(\omega)$ による入れ替えを行う方がよい。

また式 (10') をその右辺の値を距離比 $DR_{i, jj'}(\omega)$ と表わして、 q_i について解くと、中心 $O_{i, jj'}(\omega)$ 及び半径 $R_{i, jj'}(\omega)$ がそれぞれ下記式 (11) 及び (12) で与えられる球面となる。

$$O_{i, jj'}(\omega) = d_j - (d_{j'} - d_j) / (DR_{i, jj'}^2(\omega) - 1) \cdots (11)$$

$$R_{i, jj'}(\omega) = \|DR_{i, jj'}(\omega) \cdot (d_{j'} - d_j) / (DR_{i, jj'}^2(\omega) - 1)\| \cdots (12)$$

例えばセンサ $1_j, 1_{j'}$ の各位置が $d_j = (0, 0.15, 0)$, $d_{j'} = (0, -0.15, 0)$ (単位はメートル) である場合、半径 $R_{i, jj'}$ をパラメータとしたとき、式 (9) によって決まる球面の様子は図 21 に示すようになる。

つまり信号源 i は位置情報としての式 (1 1) 及び (1 2) で与えられる球面上に存在することになる。従って図 1 7 中のパーミュテーション解決部 1 7 中の距離推定部 1 7 d を括弧書きで示すように曲面推定部とし、方向情報 $u_i(\omega)$ を求めることができなかった各 i, j, j' について曲面推定部 1 7 d で、式 (1 1) の半径 $R_{i, j, j'}(\omega)$ 及び中心 $O_{i, j, j'}(\omega)$ を、図 1 8 中のステップ S 3 6 中に括弧書きで示すようにそれぞれ計算し、これら $R_{i, j, j'}(\omega)$ 及び中心 $O_{i, j, j'}(\omega)$ がどの周波数の逆行列 $H(\omega)$ でも同一順になるようにして、パーミュテーション行列 $P(\omega)$ で求めてもよい。

この円錐面情報 $\theta_{i, j, j'}(\omega)$ 又は方向情報 $u_i(\omega)$ と球面情報 $D R_{i, j, j'}(\omega)$ 又は $R_{i, j, j'}(\omega)$ を用いてもパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を求めることができない場合はその周波数について、従来の相関法(例えば、H. Sawada 他“A robust and precise method for solving the permutation problem of frequency-domain blind source separation.”, in Proc. Intl. Symp. on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation (ICA 2003), 2003, pp. 505-510 参照)を適用するとよい。図 1 7 中に破線で示すように、信号分離部 1 9 で分離された出力信号 $y_1(t), \dots, y_I(t)$ を周波数領域変換部 3 3 で例えば周波数領域変換部 1 1 と同様の方法で周波数領域の信号 $Y_1(\omega, m), \dots, Y_I(\omega, m)$ に変換し、相関算出部 3 4 において、これら周波数領域信号 $Y_1(\omega, m), \dots, Y_I(\omega, m)$ 中のパーミュテーション解決部 1 7 でパーミュテーション行列を作ることができなかった周波数成分 f_{ank} 成分と、パーミュテーション行列が得られた周波数中の f_{ank} と隣接した周波数成分との相関を計算し、パーミュテーション解決部 1 7 ではこの相関が大きくなるように周波数 f_{ank} の分離行列の行の入れ替えを行い、この行入れ替えした分離行列に基づく分離出力信号 $y_1(t), \dots, y_I(t)$ 中の f_{ank} 成分について再び相関計算部 3 4 で相関を計算し、同様のことを計算した相関が最大になるまで繰り返す。この相関の最大値が所定値に達しなかった場合は、更にその f_{ank} の成分と、パーミュテーション行列が得られている周波数成分中の f_{ank} に対する基本波又は高調波(一般には高調波)関係にあるものとの各相関の和を相関計算部 3 4 で計算し、この相関和が大きくなるように、 f_{ank} に対する分離行列の行入れ替えを修正部 1 7 e で行うことを、前記相関和が最大になるまで繰り返す。

返す。なお第2実施形態で説明したように周波数領域の信号 $X(\omega, m)$ に対し分離行列 $W(\omega)$ を適用し、周波数領域の分離信号 $Y(\omega, m)$ を求める場合は、この $Y(\omega, m)$ を相関計算部34の計算に用いればよい。

以下にこの第3実施形態の実験例を信号源として、室内で実測したインパルス
5 応答を畳み込んで作成した混合音声を用いて分離実験を行った場合について説明
する。図22に示すように残響時間が130ミリ秒、355cm×445cm×250cm（高さ）の室内の水平面内ではほぼ中心部で高さ135cmの所にセンサ
としての無指向性マイクロホン $1_1 \sim 1_4$ を直径4cmの円上に等間隔で配し（こ
れらマイクロホン $1_1 \sim 1_4$ は図中の左上に拡大して示した）、更に無指向性マイク
10 ロホン $1_5 \sim 1_8$ を直径30cmの円上に等間隔かつ、マイクロホン $1_1, 1_3, 1_5$
及び 1_7 が、またマイクロホン $1_2, 1_4, 1_6$ 及び 1_8 がそれぞれ一直線上に配列す
るように配置した。マイクロホン 1_1 から 1_5 へ方向を基準（ 0° ）とし、マイク
ロホン配置の中心を原点とし、原点から120cm離れ、 -30° 方向に音源 2_1
を、 $+30^\circ$ 方向に音源 2_2 を、 $+90^\circ$ 方向に音源 2_3 を、 -150° 方向に音源 2_4
15 をそれぞれ配置し、 150° 方向で原点からの距離60cmに音源 2_5 を、距離180cmに音源 2_6 をそれぞれ配置した。サンプリング周波数kHz、データ長6秒、フレーム長2048サンプル（256ミリ秒）、フレームシフト512サンプル（64ミリ秒）とした。

周波数領域での分離行列 $W(\omega)$ の各行のうち、マイクロホン対 1_1 と 1_3 、 1_2
20 と 1_4 、 1_1 と 1_2 、 1_2 と 1_3 に相当する行を用いて音源方向（円錐面）推定を行っ
た。推定したヒストグラムを図22に示す。図23の横軸は推定方向を、縦軸は
信号数である。これより推定方向は5つの群（クラスタ）があり、そのうち 150° 付近のクラスタは他のクラスタより2倍の大きさである。これは6個の音源中
の2個が同一方向（ 150° 付近）から到来していると推測される。4つの音源に
25 ついては推定した方向をもとにパーミュテーションを解決した。その結果を図24に示す。図24の横軸は周波数、縦軸は方向（度）を表わす。

残りの2個の音源については、広い間隔のマイクロホン対 1_7 と 1_5 、 1_7 と 1_8 、 1_6 と 1_5 、 1_6 と 1_8 を用いて音源が存在する球面の半径によって到来信号を区別した。マイクロホン対 1_7 と 1_5 を用いて推定した球面の半径を図25に示す。図

25の横軸は周波数、縦軸は半径(m)を表わす。

残響や推定誤差の影響により、位置情報だけではパーミュテーションを完全には解決することはできない。従って推定した位置情報に基づいて信号が矛盾なく分類できた周波数はその情報に基づいてパーミュテーション行列を生成し、残りの周波数については相関に基づく方法を用いてパーミュテーションを解決した。最後に時間領域の分離フィルタ係数を求める際にスペクトルの平滑化を行った。スペクトル平滑化については例えば H.Sawada 他、“Spectral smoothing for frequency-domain blind source separation”, in Proc.IWAENC 2003, 2003, pp.311-314 参照されたい。分離性能(SIR)の評価結果を図26に示す。図26中の数値の単位はdBである。Cは相関法のみによってパーミュテーションを解決したもの、D+Cは方向(円錐面)推定でパーミュテーションを解決し、解決できないものに相関法を適用したものD+S+Cは方向(円錐面)推定と球面推定とによりパーミュテーション解決を行った後、解決できなかった周波数について、相関法を用いたものである。この後者の方法によれば、6音源すべての分離ができ、SIRの改善は入力SIRから平均17.1dBとなった。

前記した第2実施形態の例ではセンサは2次元配置したが、一対のセンサにより推定する球面はこれらセンサの中心2等分線と対称に現われるため、信号源が3次元に存在している場合は2次元配置センサでは判別できなくなるため、センサも3次元配置とする必要がある。

以上説明したように、この第3実施形態においても式(9')により円錐面情報を、また式(10')により曲面情報をそれぞれ推定しているため計算量が少ない。しかも円錐面と、距離比 $DR_{i,jj'}(\omega)$ 、又は距離 $\|q_i(\omega)\|$ あるいは球面の半径 $R_{i,jj'}(\omega)$ とによりパーミュテーションを解決しているために2つ以上の信号源が同一方向もしくは互いに近い方向にある場合であっても、それらを区別できる。更にこれに相関法を加えれば一層確実に分離が可能である。なお球面情報としては計算が簡単であるから $DR_{i,jj'}(\omega)$ が好ましい。

〔第4実施形態〕

この第4実施形態では、推定した円錐面の信頼性を検証し、信頼性が高いと判断した円錐面を分離行列のパーミュテーションの解決に用いる。例えば図27に

示すように円錐面推定部 1 4 で推定された円錐面情報 $\theta^{\wedge}_{i, jj'}(\omega)$ は円錐面検証部 4 1 で許容角情報格納部 4 2 よりの許容角情報に基づき、信頼性があるか否かの検証がなされる。つまり式 (9') により求まる角度 $\theta^{\wedge}_{i, jj'}(\omega)$ はこれを求めるために用いたセンサ 1_j 及び $1_{j'}$ の配列方向に対する相対角度であり、図 4 B を参照して説明したように、角度 $\theta^{\wedge}_{i, jj'}(\omega)$ が 0 度付近及び 180 度付近の場合、正しいパーミュテーションが行われないと推定される。

従って、パーミュテーションを正しく行うことができると推定される角度の最小値 θ_{\min} と最大値 θ_{\max} が許容角情報として許容角情報格納部 4 2 に格納され、円錐面検証部 4 1 で推定円錐面情報 $\theta^{\wedge}_{i, jj'}(\omega)$ が θ_{\min} と θ_{\max} との間であれば信頼できる円錐面と判定されて出力され、つまりパーミュテーション解決に用いられるが、 θ_{\min} と θ_{\max} との間になければ、その $\theta^{\wedge}_{i, jj'}(\omega)$ は信頼性がないものとして破棄され、パーミュテーション解決に用いられない。例えば図 1 5 中の円錐面 4_{13} は破棄される。

円錐面検証部 4 1 で信頼性があると検証された円錐面情報 $\theta^{\wedge}_{i, jj'}(\omega)$ は図 1 2 中の到来方向決定部 1 6 へ送られ、又は図 1 7 で説明したように、パーミュテーション解決部 1 7 へ直接送られる。図 1 3 及び図 1 8 の処理手順において、ステップ S 1 4 の次に破線で示すようにステップ S 1 0 0 として推定円錐面 $\theta^{\wedge}_{i, jj'}(\omega)$ が信頼性があるか否かの検証が行われ、信頼性があるものについてのみ次のステップに移るようにされる。式 (9') において計算された偏角 $\arg(H_{ji}/H_{j'i})$ に含まれる誤差を $\Delta \arg H^{\wedge}$ 、推定された角度 θ^{\wedge}_i に含まれる誤差を $\Delta \theta^{\wedge}$ とすると、これらの比 $|\Delta \theta^{\wedge} / \Delta \arg H^{\wedge}|$ は式 (9') を偏微分して次式のように近似できる。

$$|\Delta \theta^{\wedge} / \Delta \arg H^{\wedge}| = |1 / (\omega c^{-1} |d_j - d_{j'}| \sin \theta^{\wedge}_i)| \quad (13)$$

式 (13) をいくつかの周波数について計算した結果を図 4 C に示す。この図 4 C から推定された角度 θ^{\wedge}_i の方向がセンサ 1_j , $1_{j'}$ のセンサペア軸に近い場合は $\arg(H_{ji}/H_{j'i})$ に含まれる誤差 $\Delta \arg H^{\wedge}$ は推定角度 θ^{\wedge}_i に対し、大きな誤差を生じさせることがわかる。つまりセンサペア軸に近い方向の推定角度 θ^{\wedge}_i を用いて分離行列 $W(\omega)$ に対するパーミュテーションの問題を解決した場合、これは正しい解にならない可能性が高い。図 4 B 及び図 4 C から例えば θ_{\min} は 2

0° 程度、 θ_{\max} は 160° 程度とされる。図 4 C からわかるように $|\Delta \theta^{\wedge} / \Delta \arg H^{\wedge}|$ は周波数により可成り異なり、低い周波数では $\Delta \arg H^{\wedge}$ が到来方向の誤差に大きく影響する。従って、低周波数については、信号源が存在する球面の推定に基づく情報 $D R_{i, jj'}$ 、 $\|q_i\|$ 、 $R_{i, jj'}$ を用いて、あるいは相関法によりパーミュテーション問題を解決するとよい。

この第 4 実施形態によれば、推定円錐面情報中の信頼性のないものは破棄されるため、これにより悪影響を受けることなく、それだけ正確に到来方向を推定でき、従って正しいパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を生成することができ、つまり分離信号の S I R (性能) が向上する。

10 [第 5 実施形態]

第 5 実施形態では位置情報として距離比、又はこれより推定した球面情報を用いる。この機能構成は図 1 7 中に示されている。図 2 8 にこの実施形態の処理手順を簡略に示す。この場合はセンサは比較的広い間隔、例えば図 2 2 に示した信号源が音源の場合、30 cm として少なくとも 2 次元に配置される。

15 先の実施形態と同様に時間領域の観測信号は図 1 7 中に示すように周波数領域の信号に変換され、分離行列生成部 1 2 により分離行列 $W(\omega)$ が生成され (ステップ S 5 1)、これより逆行列生成部 1 3 で逆行列 $H(\omega)$ が生成される (ステップ S 5 2)。各周波数における逆行列 $H(\omega)$ の各列ごとに球面情報が推定される (ステップ S 5 3)。この球面情報は第 3 実施形態で説明した方法と同様に算出
20 される。つまり球面情報は距離算出部 3 1 により算出された距離比 $D R_{i, jj'}(\omega)$ 、あるいは距離推定部又は曲面推定部 1 7 d で算出された $\|q_i\|$ 、又は半径 $R_{i, jj'}(\omega)$ 及び中心 $O_{i, jj'}(\omega)$ である。

これら球面情報を用いて、その配列順が予め決めた順になるよう分離行列 $W(\omega)$ に対するパーミュテーション行列が生成され分離行列 $W(\omega)$ の行の入れ
25 替えが行われる (ステップ S 5 4)。第 3 実施形態におけるこの処理はパーミュテーション解決部 1 7 で行われるが、ただしこの第 5 実施形態では球面情報のみを用いられる。この球面情報のみでパーミュテーションを解決できない周波数があれば、その周波数に対しては前述した相関法による解決が行われる (ステップ S 5 5)。

図22に示した室内に配したマイクロホン 1_6 及び 1_8 を用い、 120° 方向において原点から60cm及び150cmの所に音源 2_4 及び 2_5 を配し、実験室内で測定したインパルス応答に話者4名の音声を畳み込んで作成した12通りの組合せの混合音声と対する分離実験を行った。パーミュテーション解決は推定された半径 $R_{4,68}(\omega)$ と $R_{5,68}(\omega)$ を比較して $R_{4,68}(\omega) \leq R_{5,68}(\omega)$ となるようにして行った。 $R_{4,68}$ 及び $R_{5,68}$ 中の最大値が、 $R_{4,68}$ 及び $R_{5,68}$ 中の最小値に
 5 しきい値 A_{th} を乗算した値以上、つまり $\max(R_{4,68}, R_{5,68}) \geq A_{th} \cdot \min(R_{4,68}, R_{5,68})$ を満す周波数は音源位置($R_{4,68}(\omega)$, $R_{5,68}(\omega)$)によるパーミュテーションの解決が信頼できると判断して、音源位置による方法を適用し、
 10 それ以外の周波数では相関による方法を適用した。従って $A_{th}=1.0$ のときは全て音源位置による方法を適用し A_{th} が無限大のときは全て相関による方法を適用することになる。しきい値 A_{th} を変化させながら分離性能としてSIR(信号干渉比)を音声の組合せごとにプロットした結果を図29に示す。この結果より音源位置のみによる方法では全体的に性能が悪く、相関のみによる方法では分
 15 離性能がばらつき、両者を併用すると安定して高い性能が得られることがわかる。またしきい値 A_{th} としては比較的大きい値が好ましく、8~16で全体の $1/5 \sim 1/10$ 程度の周波数を音源位置によって決定できることがわかる。

また図22に示した実験条件で音源位置による方法と相関による方法を併用した実験結果を図26中のD+Cの欄に示す。これよりこの併用方法によれば可成
 20 り性能よく分離が行われることがわかる。この結果は式(9')を用いる到来方向(円錐面情報)による方法と相関による方法とを併用した場合と同様の傾向がある。なお、到来方向による方法と相関による方法とを併用した場合の実験結果は、相関による方法の説明で引用した文献に示されている。

この第5実施形態によれば式(10')により球面情報を求めているため計算量
 25 が少ない。なお球面情報としては距離比 $DR_{i,jj'}(\omega)$ が好ましい。

[第6実施形態]

第6実施形態は例えば一つの推定円錐面に基づき、パーミュテーションの問題を解決する。図12中に破線で示すように円錐面推定部14で推定された円錐面
 $\theta_{i,jj'}^{\wedge}(\omega_1), \dots, \theta_{i,jj'}^{\wedge}(\omega_N)$ 、はパーミュテーション解決部17へ

直接入力され、図 13 中に破線で示すようにステップ S 14 で設定された円錐面 $\theta_{i, jj'}^{(n)}$ ($n=1, \dots, N$) がステップ S 15 の処理をすることなくステップ S 16 でどの周波数においても例えば $\theta_{i, jj'}^{(n)}$ が昇順になるようなパーミュテーション行列 $P(\omega)$ が算出される。

- 5 この場合、ステップ S 14 で信号源 i ごとに 1 つの円錐面を推定するのみでもよい。また図に示していないが、行入れ替えができなかったものについては、第 3 実施形態で説明したように相関法による行入れ替えを得るようにしてもよい。

10 この第 6 実施形態によれば逆行列 $H(\omega)$ の各列ごとの二つの要素比をとることによりスケーリングの問題が簡単に除去され、式 (9') の演算をすればよく計算時間が短くて済む。

[信号分離のまとめ]

- 15 以上述べたブラインド信号分離におけるパーミュテーションを解決した分離行列の生成方法を、逆行列の生成以後の処理を図 30 A、図 30 B、図 30 C に示す。図 30 A では逆行列の各列の要素比から円錐面を推定し (ステップ S 61)、必要に応じて信頼性のない円錐面を破棄し (ステップ S 62)、これらの複数の円錐面から共通直線の方
- 20 向を決定し (ステップ S 63)、共通直線方向を用いてパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を生成して分離行列の入れ替えを行い (ステップ S 64)、パーミュテーションを解決できなかった周波数に対しては相関法による分離行列の行入れ替えを行う (ステップ S 65)。図 30 A 中に破線で示すように、ステップ S 6 からステップ S 6 4 に直ちに

- 25 移り、円錐面を直接用いてパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を生成してもよい。
- 図 30 B では前記ステップ S 61 の円錐面推定、必要に応じて前記ステップ S 62 の円錐面破棄を行い、ステップ S 63 の共通直線方向推定を行い、これら共通直線方向を用いて逆行列の列の入れ替えを行う (ステップ S 66)。この際、図中破線で示すようにステップ S 61 で推定された円錐面又はステップ S 62 で処理後の円錐面を直接、ステップ S 66 の処理に用いてもよい。次に円錐面の推定又は共通直線方向の決定ができなかった、又は円錐面或いは共通直線方向が不確かなものと対応する、或いは同一値となったものについて、その逆行列の列の要素比から球面情報を推定し (ステップ S 67)、この推定した球面情報を用いて逆

行列の入れ替えを行ってパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を生成して分離行列の行入れ替えを行う (ステップ S 6 4)。更にこのパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を作ることができなかった周波数に対しては相関による方法を適用する (ステップ S 6 5)。

- 5 図 3 0 C はまず逆行列の各列の要素比から球面情報を推定し (ステップ S 6 8)、この球面情報を用いて逆行列の列の入れ替えを行い (ステップ S 6 9)、この列の入れ替えを行うことができなかった、又は球面情報が不確かなものについて、その逆行列の列の要素比から円錐面を推定し (ステップ S 7 0)、これらの複数の円錐面の共通直線方向を決定し (ステップ S 7 1)、この決定した方向又はステップ
- 10 S 7 0 で推定した円錐面を直接用いて、逆行列の列の入れ替えを行ってパーミュテーション行列 $P(\omega)$ を生成し、分離行列の入れ替えを行う (ステップ S 6 4)。パーミュテーション行列を作ることができなかった周波数に対して相関法を適用する (ステップ S 6 5)。

これらに対し更に図 2 8 に示した方法がある。

- 15 第 3 実施形態、第 5 実施形態及び第 6 実施形態においても、第 2 実施形態で説明したように、周波数領域の分離行列 $W(\omega)$ と観測信号 $X(\omega)$ とを用いて信号分離を行い、その後、分離された周波数領域信号 $Y(\omega)$ を時間領域信号 $y(t)$ に変換してもよい。

- 第 1 実施形態の説明では 2 次元における信号の到来方向の推定を行ったが、第
- 20 2 実施形態中でも説明したように、3 次元における信号の到来方向の推定にも適用できる。また第 2 乃至第 6 実施形態を 2 次元における信号分離に適用することもできる。この場合は推定円錐面 $\theta_{i, jj'}^{\wedge}(\omega)$ はその推定に用いたセンサ対のセンサペア軸に対し対称の 2 方向となり、推定球面 $R_{i, jj'}(\omega)$ 又は $DR_{i, jj'}(\omega)$ は円の半径又はこれとほぼ対応するものになる。

- 25 図 5、図 1 2、図 1 7 にそれぞれ示した装置、また第 5 実施形態による装置はそれぞれコンピュータに機能させることもできる。この場合、それぞれと対応した処理手順、つまり図 6、図 1 3、図 1 8 などに示した各過程をコンピュータに実行させるためのプログラムを記録した磁気ディスク、半導体メモリ、CD-R OM などから、コンピュータ内のメモリにインストールし、又は通信回線を介し

てコンピュータ内のメモリに前記プログラムをダウンロードして、コンピュータにそのプログラムを実行させればよい。

請求の範囲

1. I箇所の信号源から放射された信号を、J個のセンサで検出して上記信号源の位置情報を求める信号源位置情報推定装置であって、Iは2以上の整数、Jは
5 I以上の整数であり、
上記各センサの観測信号を周波数領域の信号に変換する周波数領域変換手段と、
上記周波数領域の信号から、独立成分分析により周波数ごとに、信号源信号を分離する第1分離行列をそれぞれ算出する分離行列算出手段と、
上記各第1分離行列の逆行列をあるいは擬似逆行列「以下、両者を単に逆行列と
10 いう」をそれぞれ算出する逆行列算出手段と、
上記周波数ごとの逆行列の少なくとも1つに対し、その各列ごとにその二つの要素比から上記信号源の一つの位置情報を計算する位置情報計算手段とを具備する。
2. 請求の範囲第1項記載の装置において、
15 上記位置情報計算手段は、上記周波数ごとの逆行列の複数について、上記各列ごとの要素比からの位置情報計算により上記各信号源の位置情報を求める手段であり、
上記周波数ごとの信号源ごとの位置情報から、上記複数の逆行列と対応する周波数の分離行列における位置情報と対応する行が予め決めた順序になるように行
20 の入れ替えを行うパーミュテーション行列を生成するパーミュテーション行列生成手段と、
上記パーミュテーション行列と上記第1の分離行列とを乗算して行を入れ替えた第2の分離行列を求める並替手段とを備える。
3. 請求の範囲第2項記載の装置において、
25 上記Jは3以上であり、かつJ個のセンサは少なくとも2次元に配置され、
上記位置情報は上記センサから上記信号源へ方向を含み、その信号源が存在する円錐面であり、
上記位置情報計算手段は、各列ごとの上記要素比から上記円錐面の計算を異なる二つの要素組の複数について行う手段と、周波数ごとの上記複数の円錐面の

共通直線の方角を、上記位置情報として推定する到来方角決定手段を含む。

4. 請求の範囲第2項記載の装置において、

上記Jは3以上であり、上記位置情報は一対のセンサから上記信号源への方角を含み、その信号源が存在する円錐面及びその信号源が存在する曲面であり、

5 上記位置情報計算手段は、上記二つの要素の比から上記円錐面を計算する手段と、上記円錐面の計算に用いた二つの要素と対応するセンサ間隔よりも大きいセンサ間隔のセンサと対応する二つの要素の比からこれらセンサと上記信号線との距離比を計算する手段と、上記距離比から上記曲面を計算する手段を備え、

10 上記パーミュテーション行列生成手段は周波数ごとに上記円錐面及び上記曲面に基づいて上記パーミュテーション行列を生成する手段である。

5. 請求の範囲第2項、第3項又は第4項に記載の装置において、

上記Jは3以上であり、上記J個のセンサは少なくとも2次元に配置され、

上記位置情報は上記センサから上記信号源への方角を含み、その信号源が存在する円錐面であり、

15 上記円錐面を表わす角度が予め決めた第1角度と第2角度との間であるか否かを判定し、これら第1角度及び第2角度の間の円錐面を有効とする判定手段を備える。

6. 請求の範囲第2項記載の装置において、

上記Jは3以上であり、上記J個のセンサは少なくとも2次元に配置され、

20 上記位置情報は信号源が存在する球面の半径であり、

上記位置情報計算手段は上記二つの要素比から距離比を計算する手段である。

7. 請求の範囲第2項に記載の装置において、

上記位置情報は上記センサから上記信号源への方角を含みその信号源が存在する円錐面である。

25 8. 請求の範囲第2項、第3項、第4項、第6項又は第7項に記載の装置において、

上記観測信号に対し、上記第2分離行列を用いて分離した信号の周波数領域の信号中の、上記パーミュテーション行列生成手段で、パーミュテーション行列が得られない周波数成分と、パーミュテーション行列が得られた周波数成分との相

関を計算する相関計算手段と、

上記相関が大きくなるように上記パーミュテーション行列が得られない周波数の分離行列の行を入れ替えるパーミュテーション行列を生成する修正手段とを備える。

5 9. 請求の範囲第1項記載の装置において、

上記位置情報は上記センサから上記信号源への方向情報であり、

上記位置情報計算手段は、上記比の偏角を計算する手段と、単位距離当たりの位相回転量と上記二つの要素とそれぞれ対応する上記センサ間の距離との積を計算する手段と、上記偏角を上記積の結果で除算する手段と、その除算結果の逆コ

10 サインを計算して上記方向情報を出力する手段とを備える。

10. 請求の範囲第9項記載の装置において、

上記位置情報計算手段は、一つの信号源の上記方向情報を、周波数ごとに計算する手段であり、上記各一つの信号源ごとに計算された周波数ごとの方向情報を統合して方向情報を確定する統合手段を備える。

15 11. I箇所の信号源から放射された信号を、J個のセンサで検出して上記信号源の位置情報を求める信号源位置情報推定方法であって、Iは2以上の整数、JはI以上の整数であり、

上記各センサの観測信号を周波数領域の信号に変換する周波数領域変換過程と、

20 上記周波数領域の信号から、独立成分分析により周波数ごとに、信号源信号を分離する第1分離行列をそれぞれ算出する分離行列算出過程と、

上記各第1分離行列の逆行列あるいは擬似逆行列(以下、両者を単に逆行逆列という)をそれぞれ算出する逆行列算出過程と、

上記周波数ごとの逆行列の少なくとも1つにおける列ごとの異なる二つの要素比から上記信号源の一つの位置情報を計算する位置情報計算過程とを有する。

25 12. 請求の範囲第11記載の方法において、

上記位置情報計算過程は、上記周波数ごとの逆行列の複数について、各列ごとの上記要素比からの位置情報計算により上記各信号源の位置情報を求める過程であり、

上記周波数ごとの信号源ごとの位置情報から、上記複数の逆行列と対応する分

離行列における位置情報と対応する行が予め決めた順序になるように行の入れ替えを行うパーミュテーション行列を生成するパーミュテーション行列生成過程と、

上記パーミュテーション行列と上記第1の分離行列とを乗算して行を入れ替えた第2分離行列を求める分離行列置換過程とを有する。

5 13. 請求の範囲第12項記載の方法において、

$J \geq 3$ であり、かつJ個のセンサは少なくとも2次元に配置され、

上記位置情報は上記センサから上記信号源へ方向を含み、

その信号源が存在する円錐面であり、

10 上記位置情報計算過程は、各列ごとの上記要素比から上記円錐面の計算を異なる二つの要素組の複数について行う過程であり、周波数ごとの上記複数の円錐面の共通直線方向を、上記位置情報として推定する共通線推定過程を含む。

14. 請求の範囲第12項記載の方法において、

$J \geq 3$ であり、上記位置情報は一对のセンサから上記信号源へ方向を含み、

その信号源が存在する円錐面及びその信号源が存在する曲面であり、

15 上記位置情報計算過程は、上記2つの要素の比から上記円錐面を計算する過程と、上記円錐面の計算に用いた2つの要素と対応する一对のセンサの間隔より大きい間隔の一对のセンサと対応する2つの要素の比からこれら一对のセンサと一つの信号源との距離比を計算する過程と、上記距離比から上記曲面を計算する過程を有し、

20 上記パーミュテーション行列生成過程は周波数ごとに上記円錐面及び上記球面に基づいて上記パーミュテーション行列を生成する過程である。

15. 請求の範囲第14項記載の方法において、

上記パーミュテーション行列生成過程は、円錐面及び上記球面の一方について上記位置情報計算過程を実行させ、得られた上記一方の位置情報に基づいて、各

25 周波数での逆行列の各列と対応する上記一方の位置情報が予め決めた順になるように列の入れ替えを行う第1の入替行列を生成する過程と、

この過程により、列の入れ替えを行うことができない列について上記位置情報の他方について上記位置情報計算過程を実行させ、得られた上記他方の位置情報に基づいて上記逆行列の列の入れ替えを行うように上記第1の入替行列を修正し

て第2の入替行列を生成する過程と、上記第2の入替行列の逆行列を計算して上記パーミュテーションとを有する。

16. 請求の範囲第12項乃至第15項のいずれかに記載の方法において、
J \geq 3であり、上記J個のセンサは少なくとも2次元に配置され、

5 上記位置情報は上記センサから上記信号源への方向を含み、その信号源が存在する円錐面であり、

上記円錐面を表わす角度が予め決めた第1角度と第2角度との間であるか否かを判定し、これら角度の間でない円錐面を破棄する判定過程を有する。

17. 請求の範囲第12項に記載の方法において、

10 J \geq 3であり、上記J個のセンサは少なくとも2次元に配置され、
上記位置情報は信号源が存在する球面の半径であり、

上記位置情報計算過程は上記二つの要素比から距離比を計算する過程である。

18. 請求の範囲第12項に記載の方法において、

15 上記位置情報は上記センサから上記信号源への方向を含み、その信号源が存在する円錐面である。

19. 請求の範囲第12項～第15項のいずれか又は第17項又は第18項に記載の方法において、

上記パーミュテーション行列生成過程でパーミュテーション行列を生成できない周波数があれば、

20 上記観測信号を上記第2分離行列で分離した信号の周波数領域の信号中の上記パーミュテーション行列を生成できた周波数成分と上記パーミュテーション行列を生成できない周波数成分との相関を計算する過程と、

この計算した相関が大きくなるように、上記生成できなかった周波数の分離行列に対するパーミュテーション行列を生成する過程とを有する。

25 20. 請求の範囲第11項記載の方法において、

上記位置情報は上記センサから上記信号源への方向情報であり、

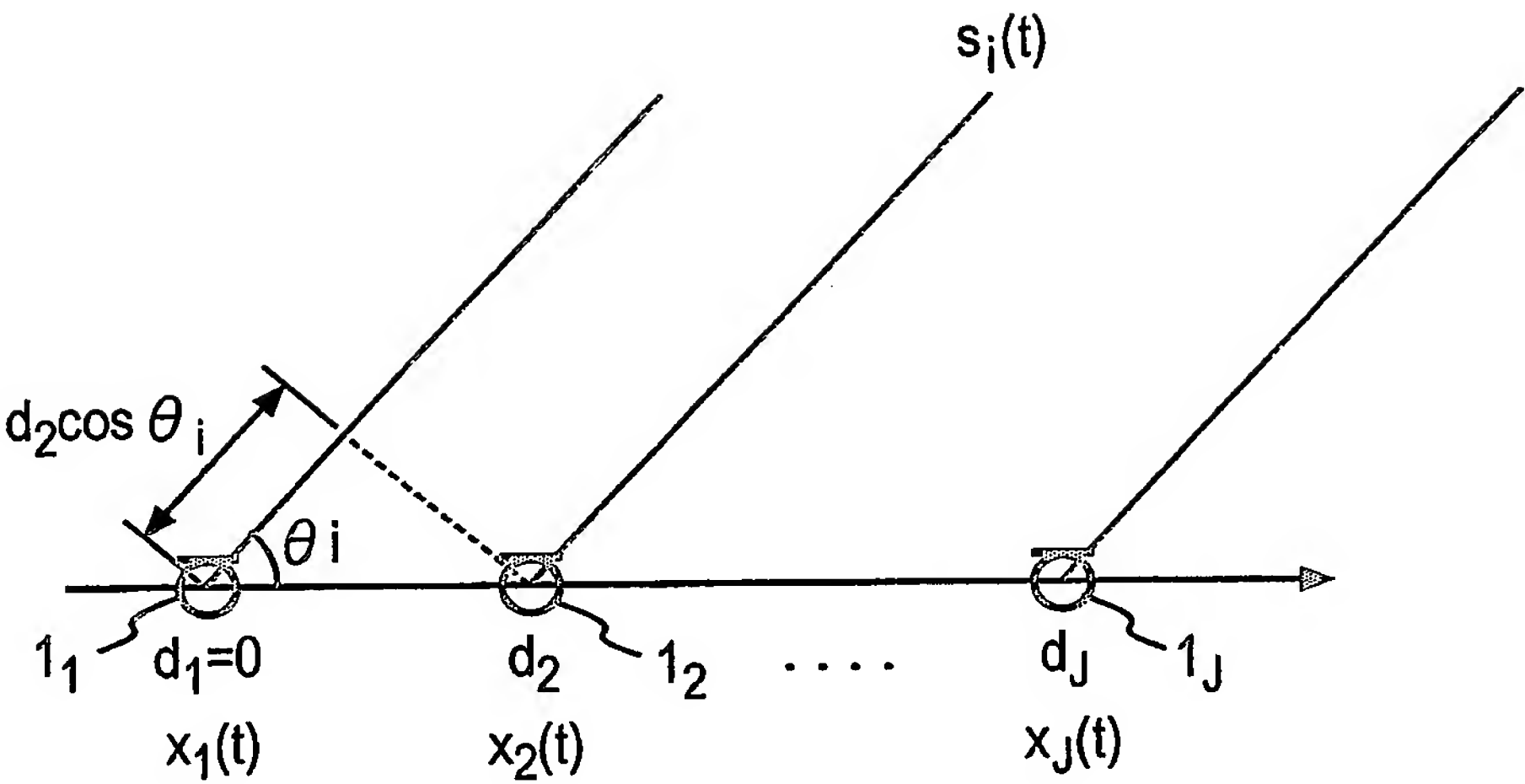
上記位置情報計算過程は、上記比の偏角を、単位距離当たりの位相回転量と上記二つの要素とそれぞれ対応する上記センサ間の距離との積で除算し、その除算結果の逆コサインを計算して上記方向情報を出力する過程である。

21. 請求の範囲第20項記載の方法において、

上記位置情報計算過程は、一つの信号源の上記方向情報を、周波数ごとに計算する過程であり、上記各一つの信号源ごとに計算された周波数ごとの方向情報を統合して方向情報を確定する統合過程を有する。

- 5 22. 請求の範囲第11項乃至第19項のいずれかに記載した信号源位置情報推定方法の各過程をコンピュータに実行させるためのプログラム。

図 1



2/22

図2

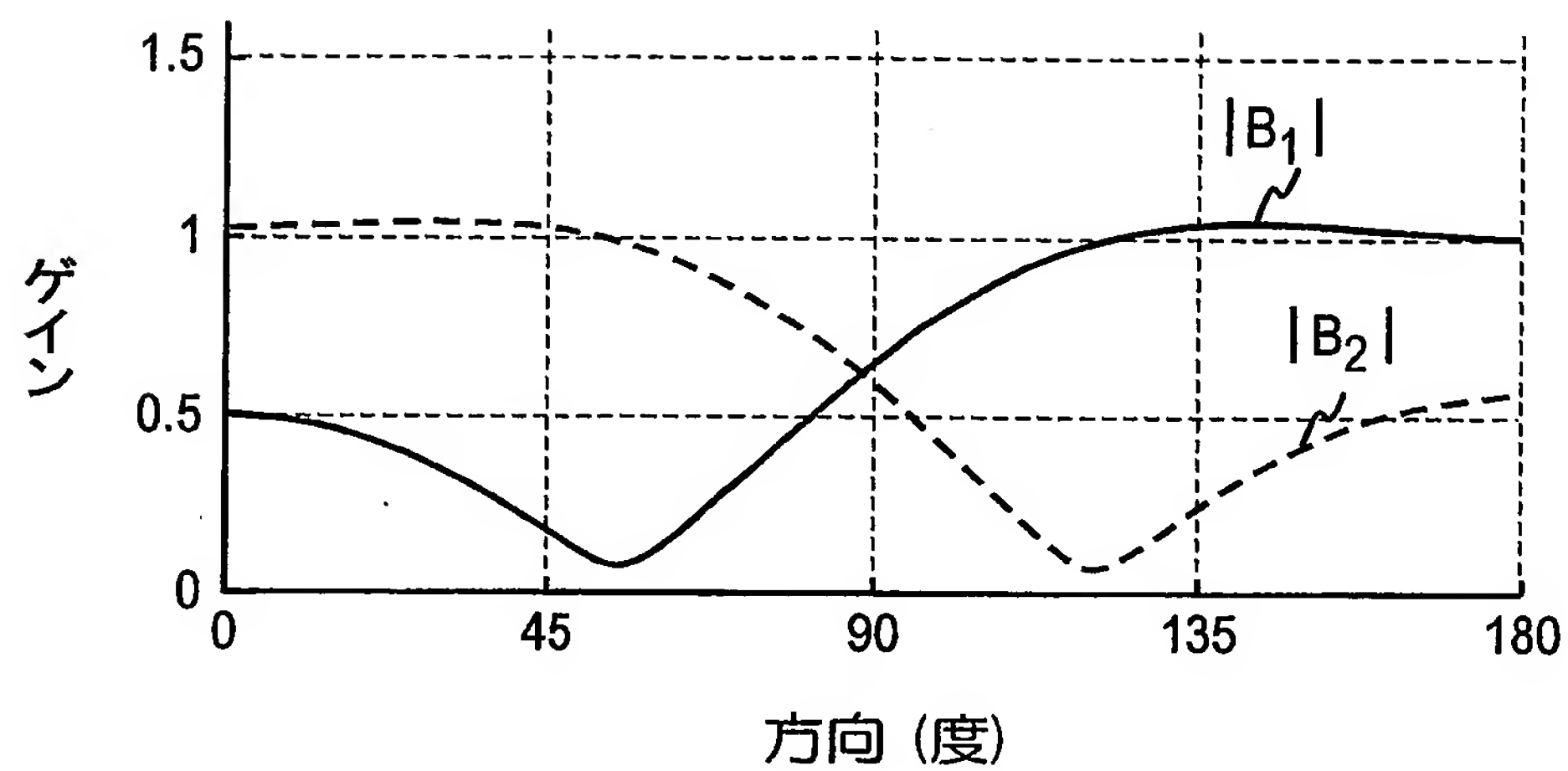
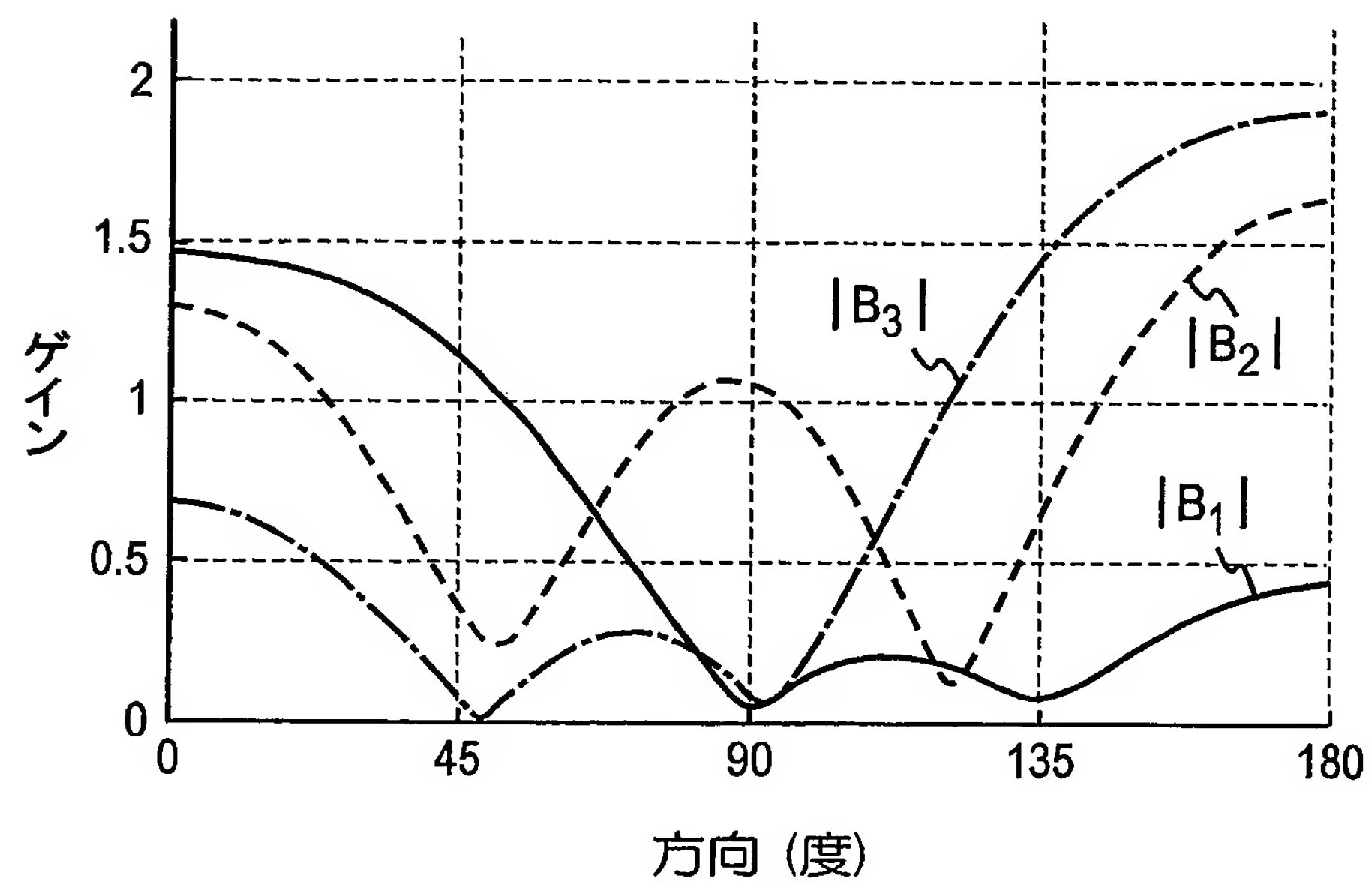


図3



3/22

図4A

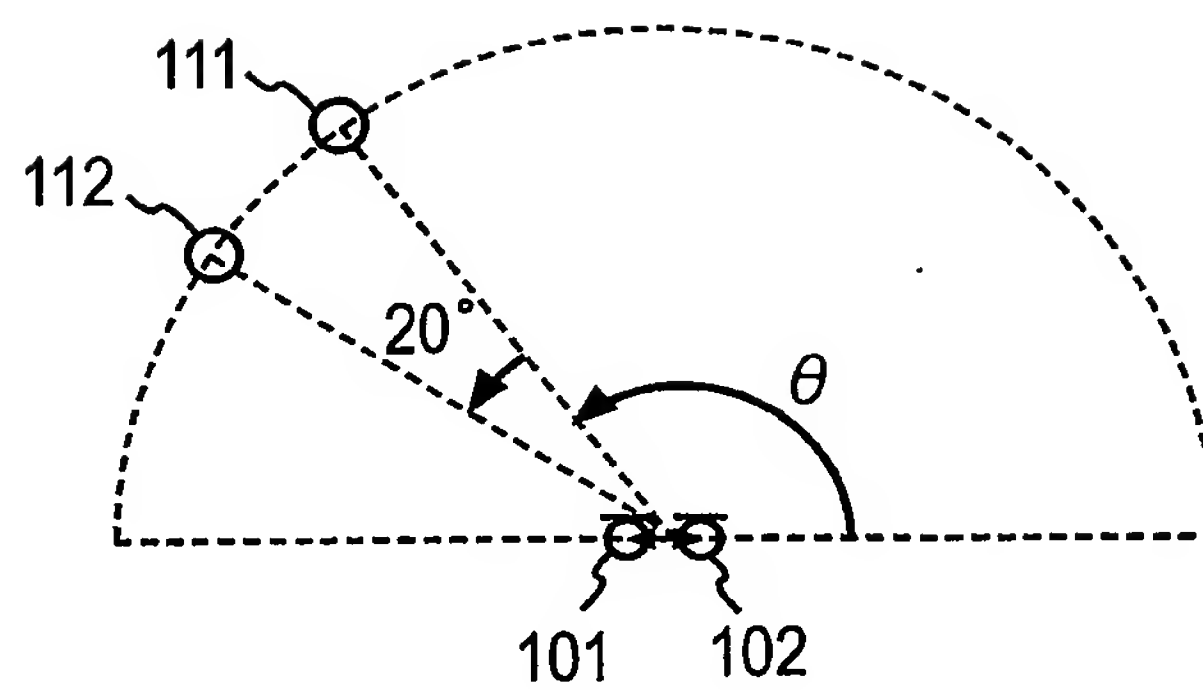


図4B

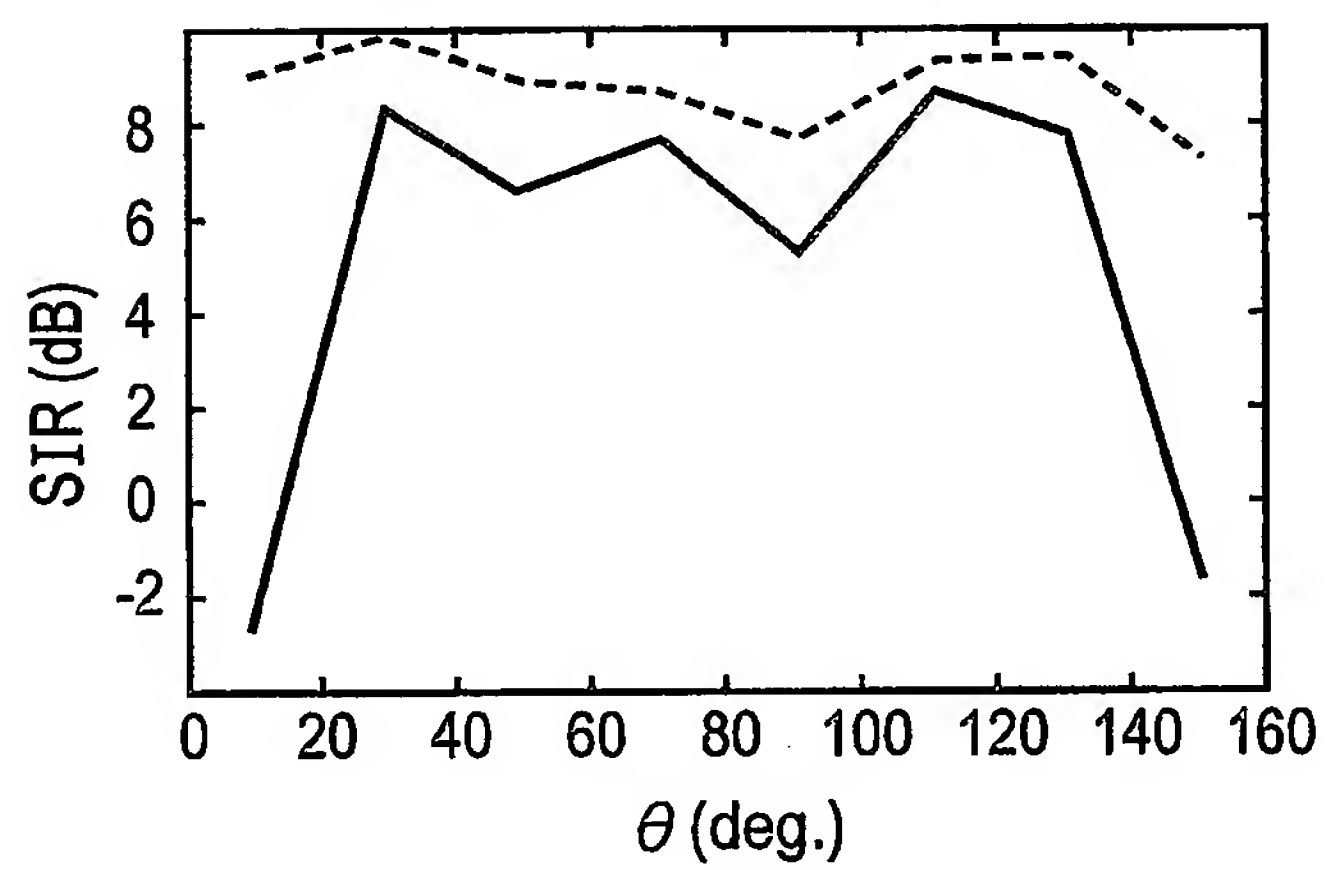
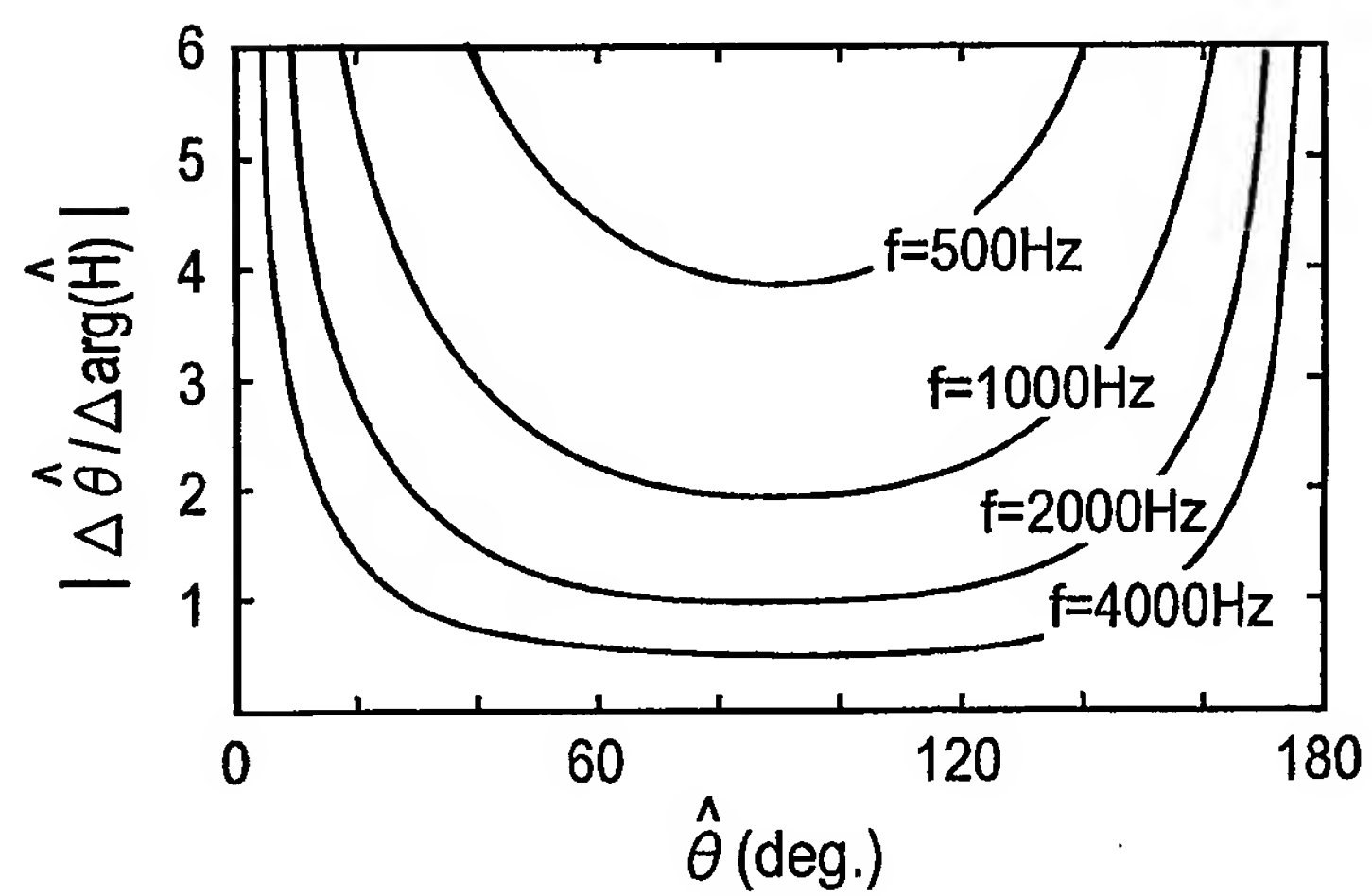


図4C



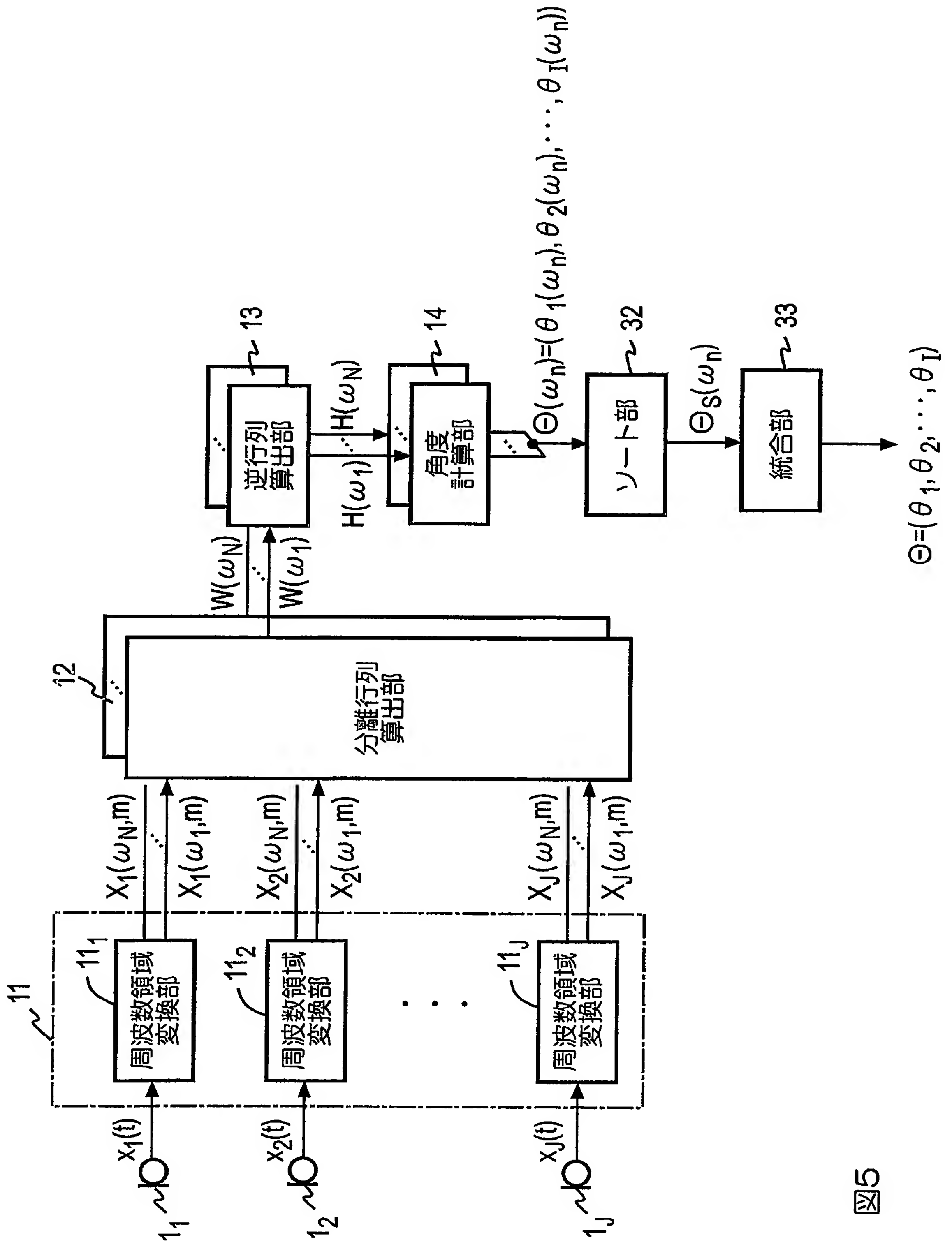


図5

5/22

図6

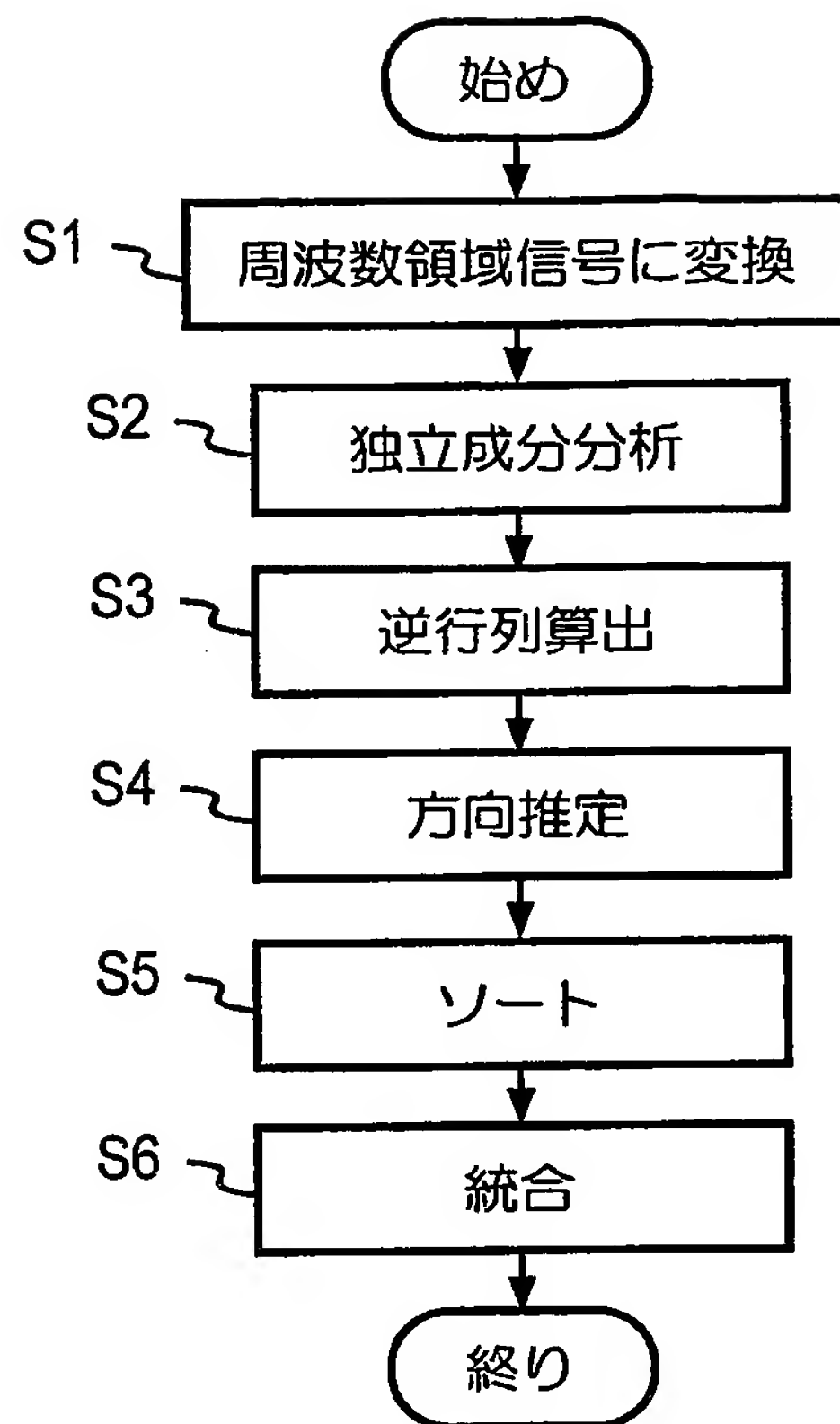
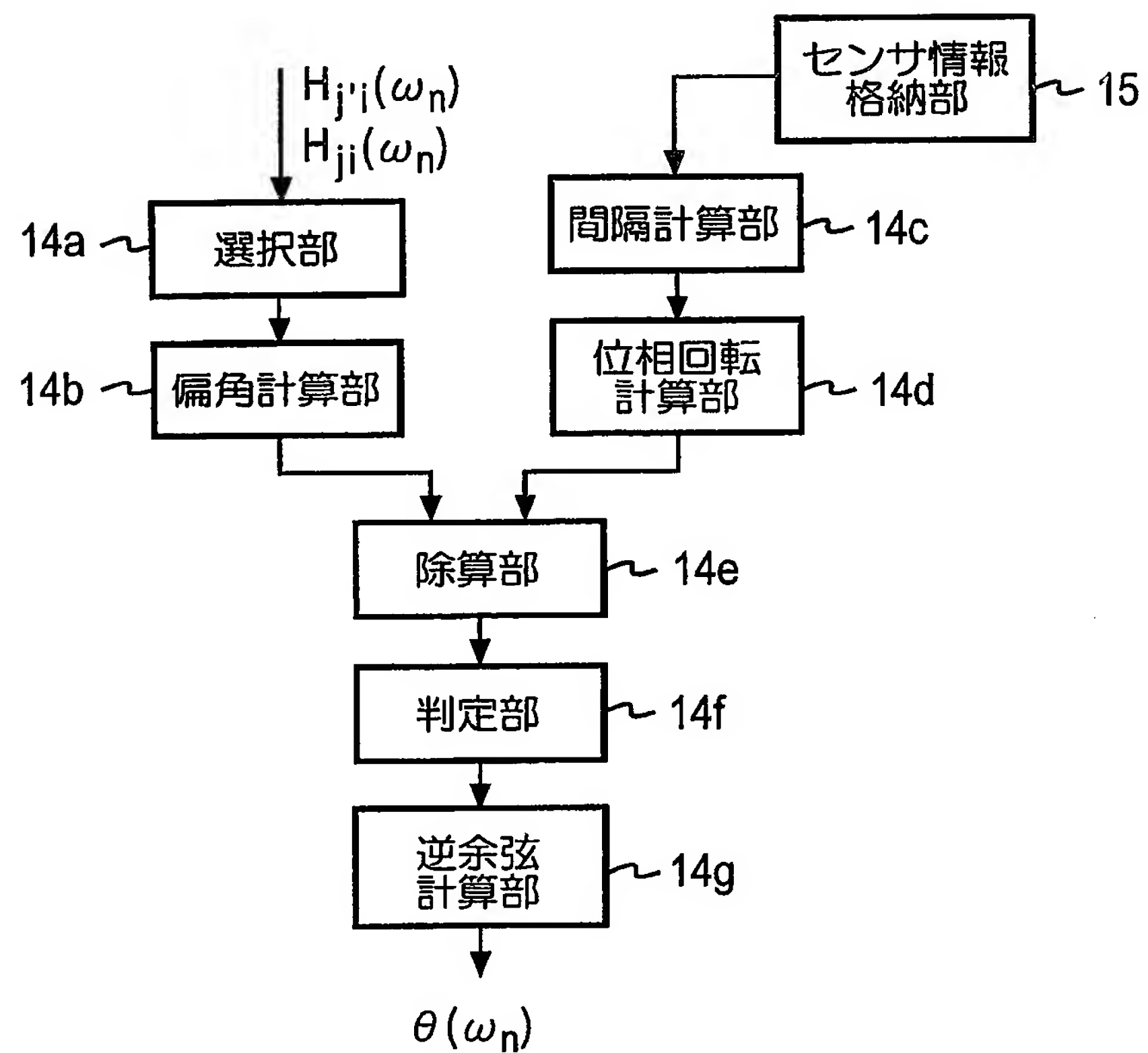
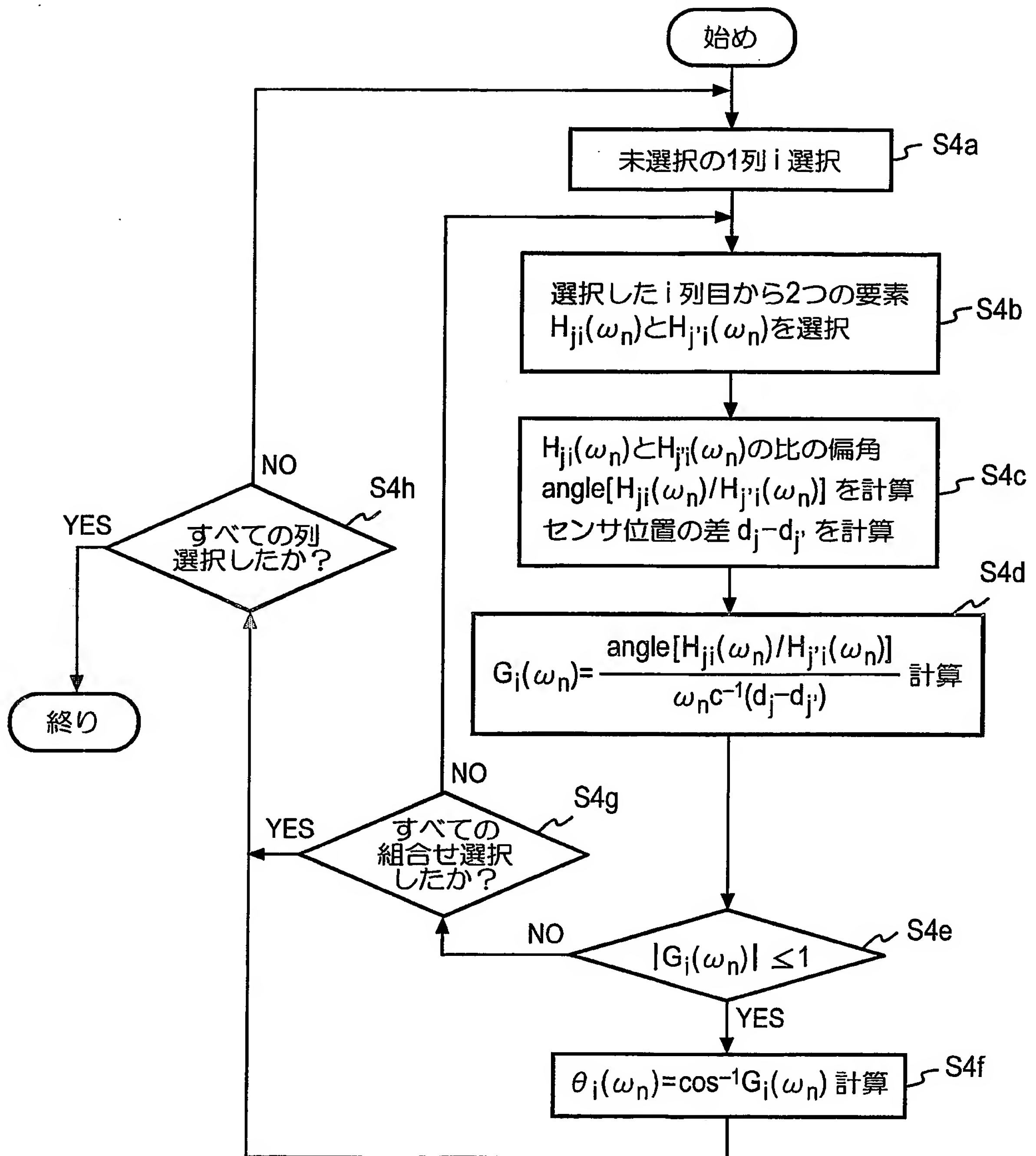


図7



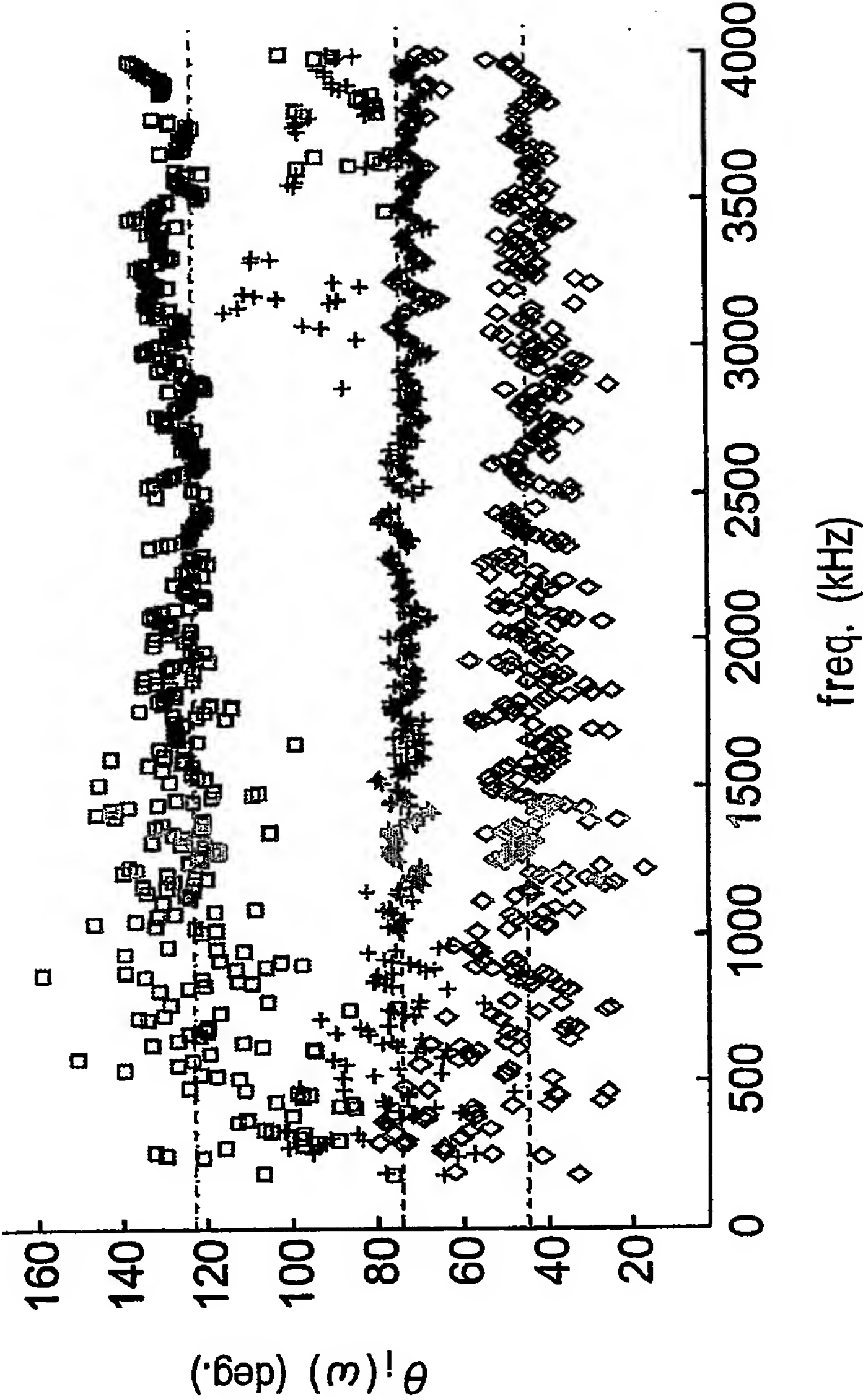
6/22

図8



7/22

FIG 9



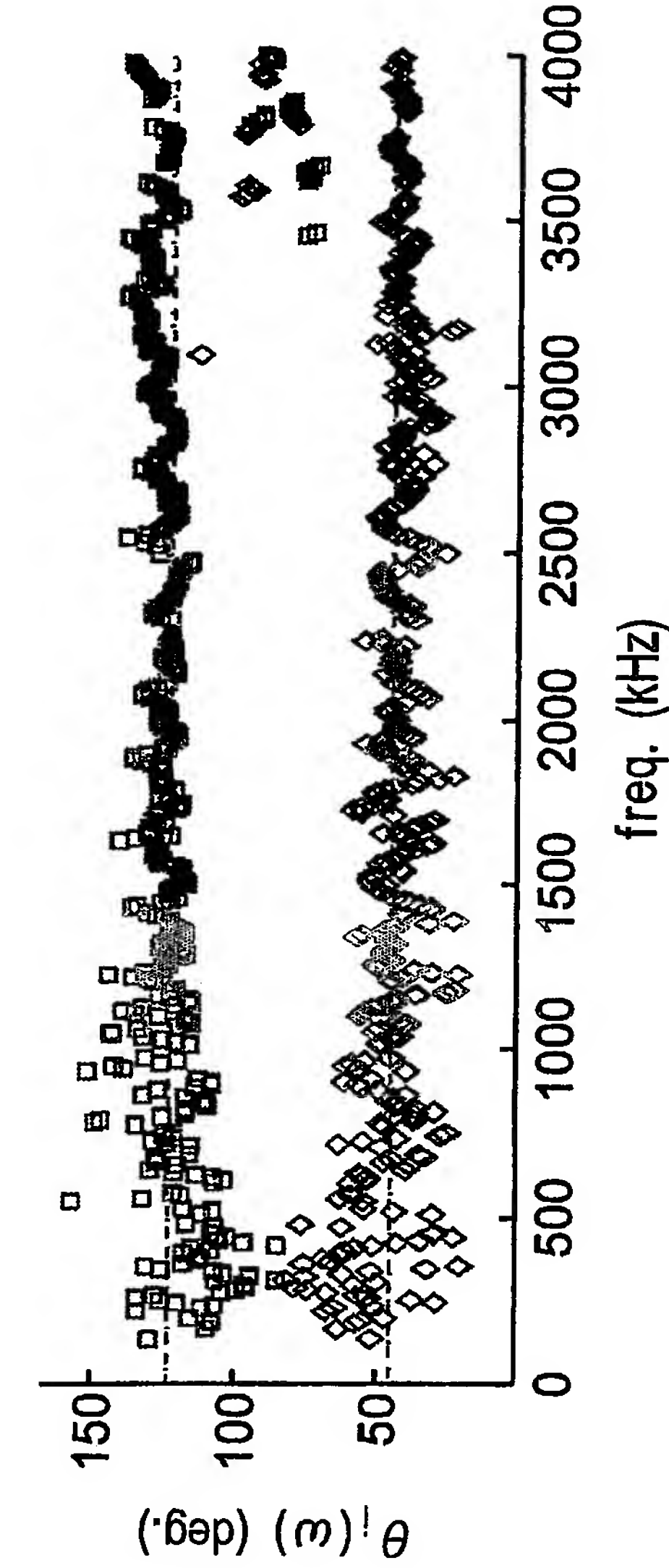


図10A

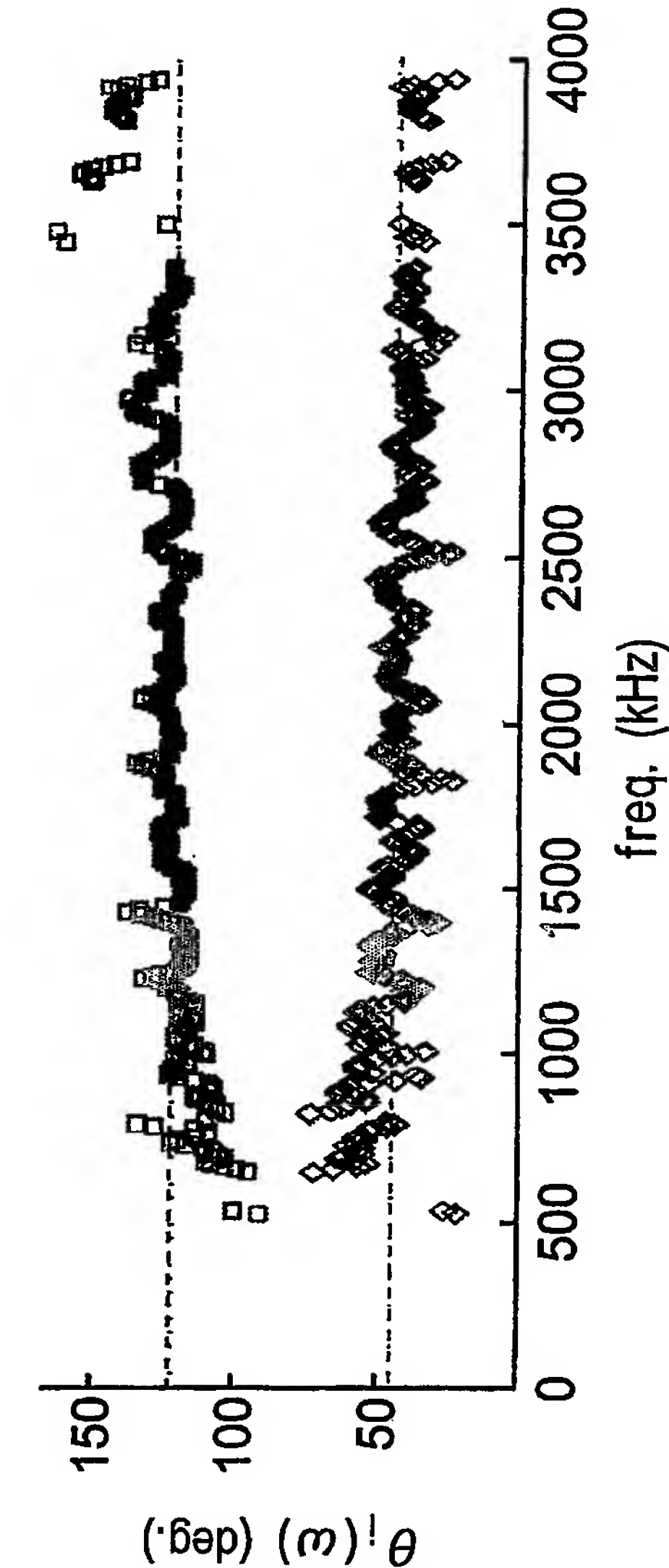


図10B

図11A

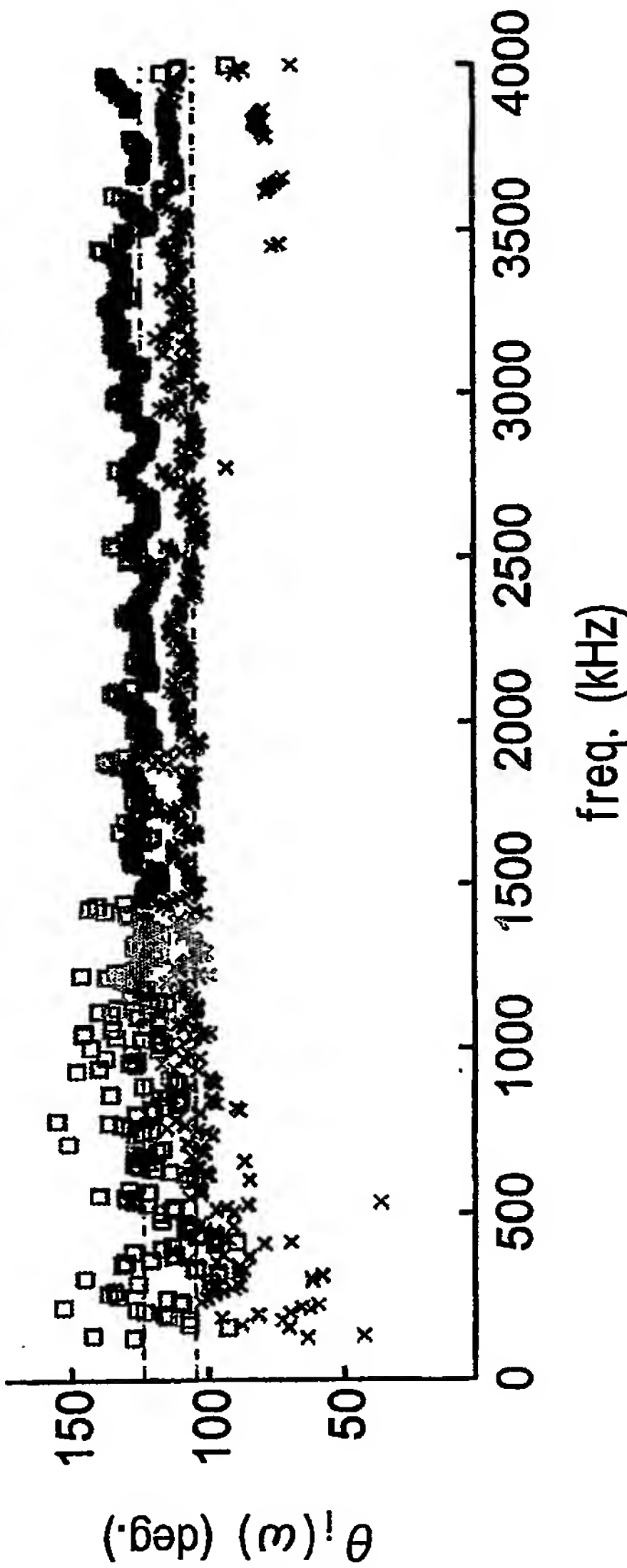
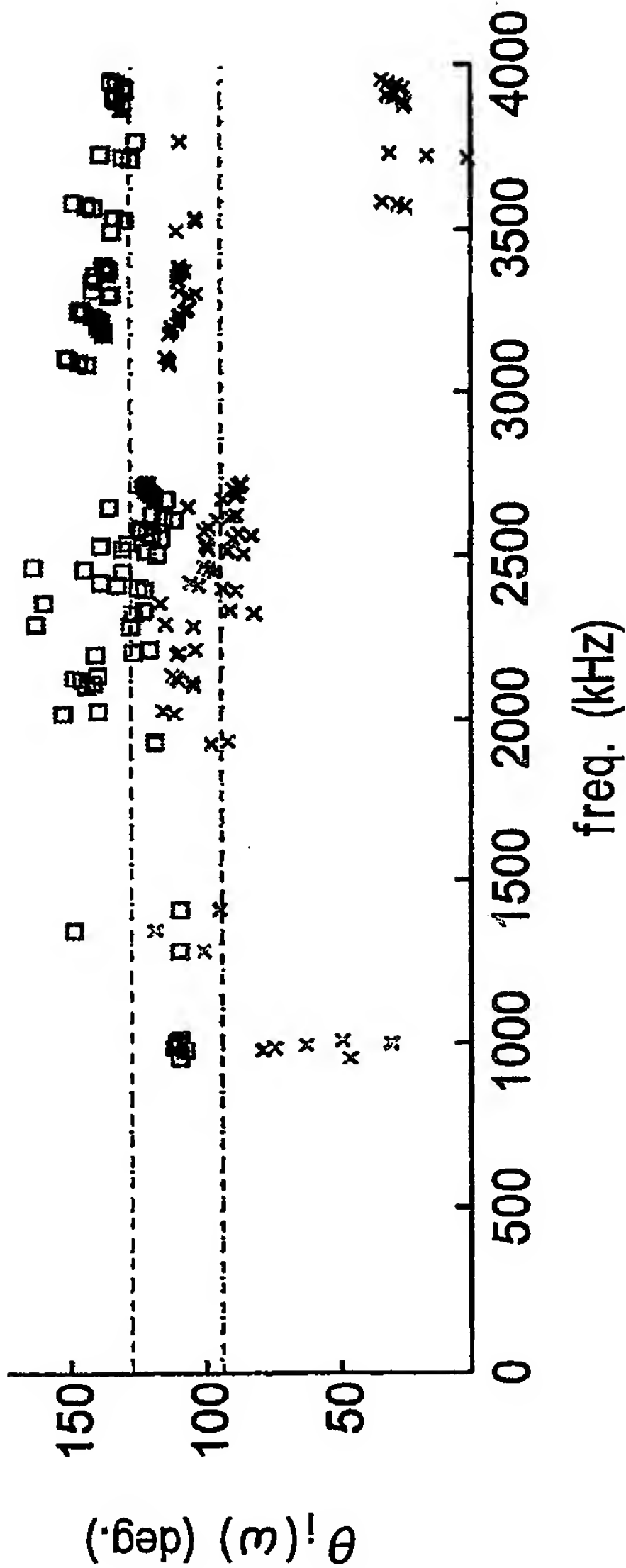


図11B



10/22

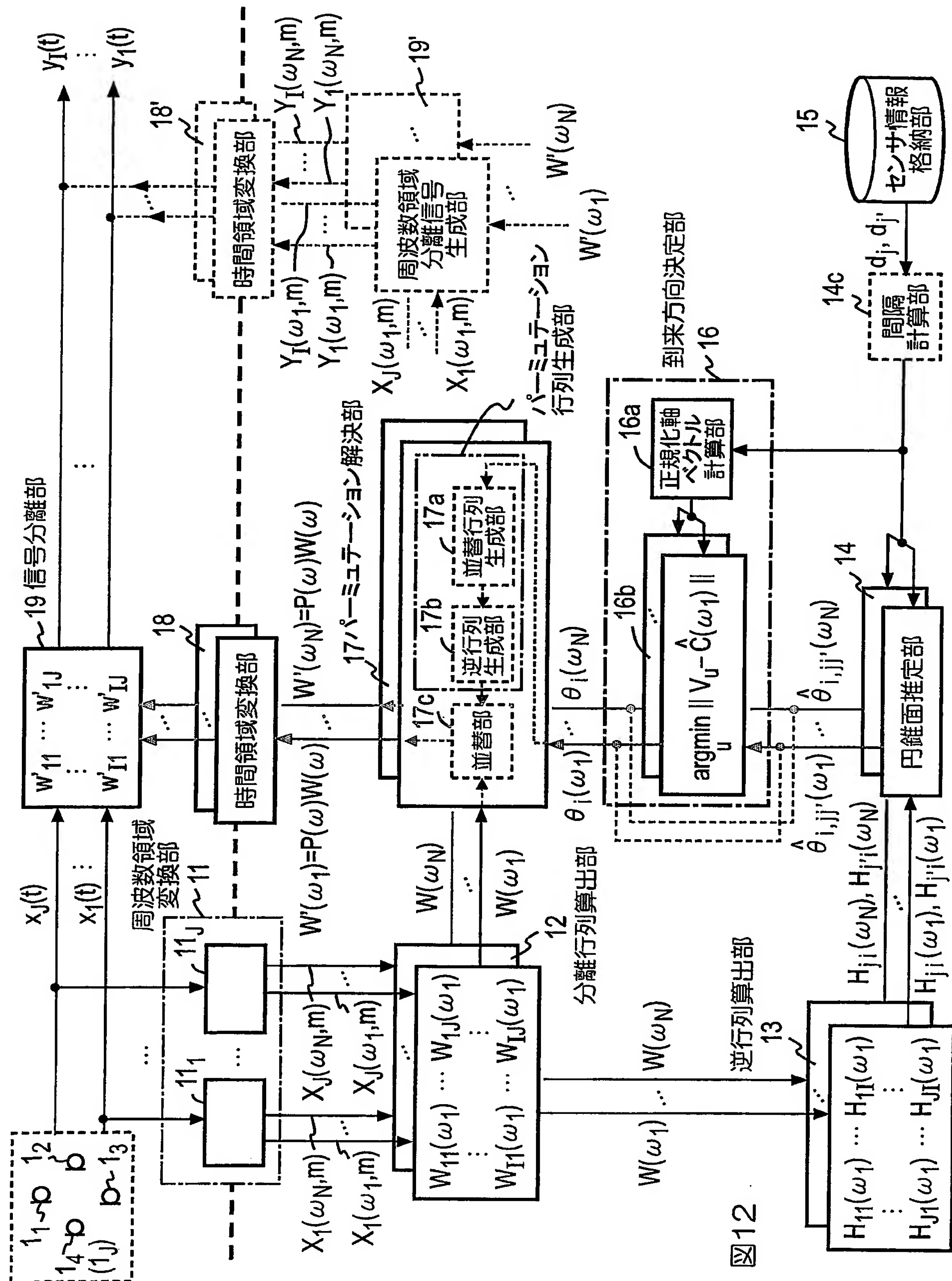
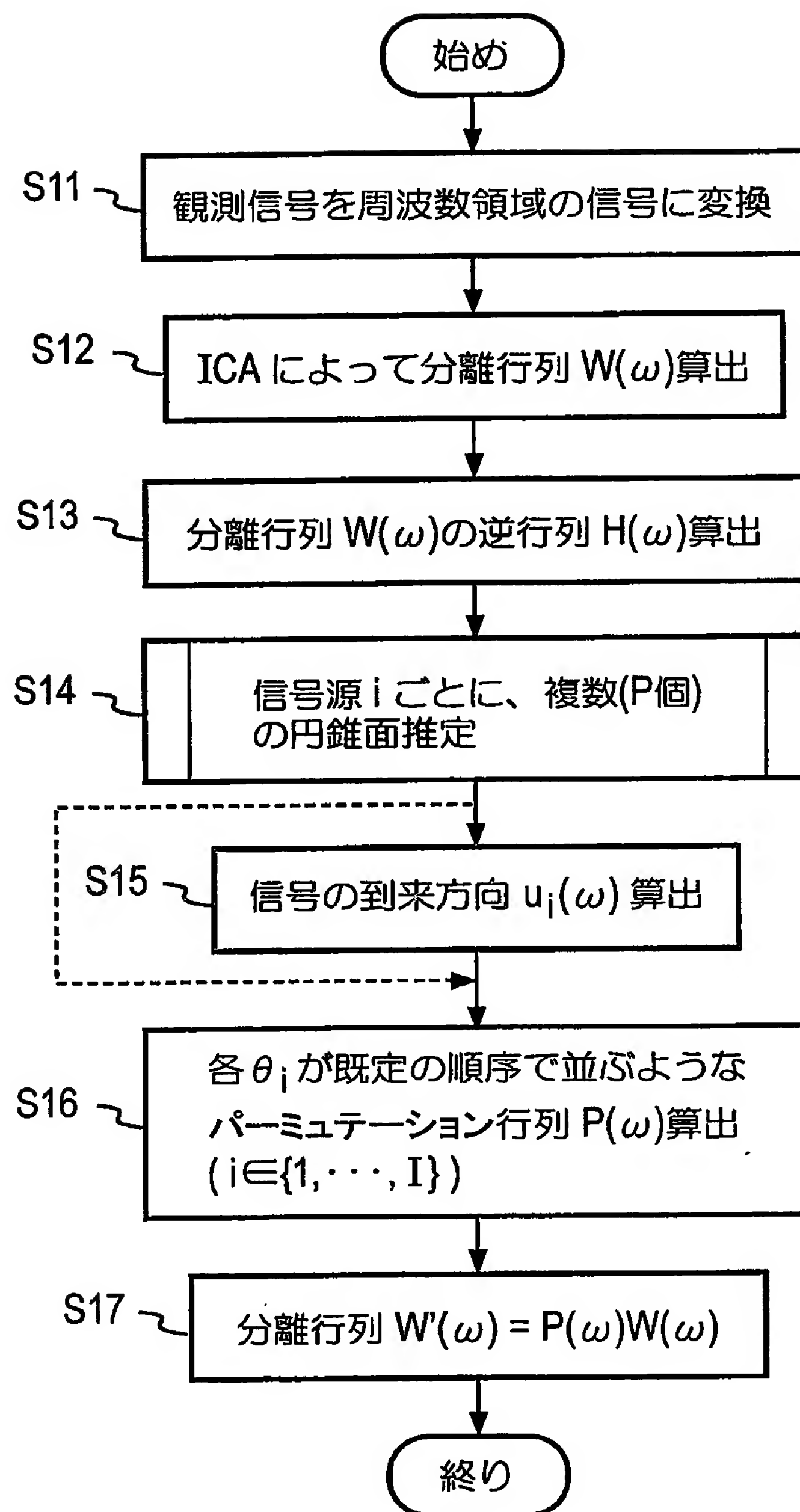


図12

11/22

図13



12/22

図14

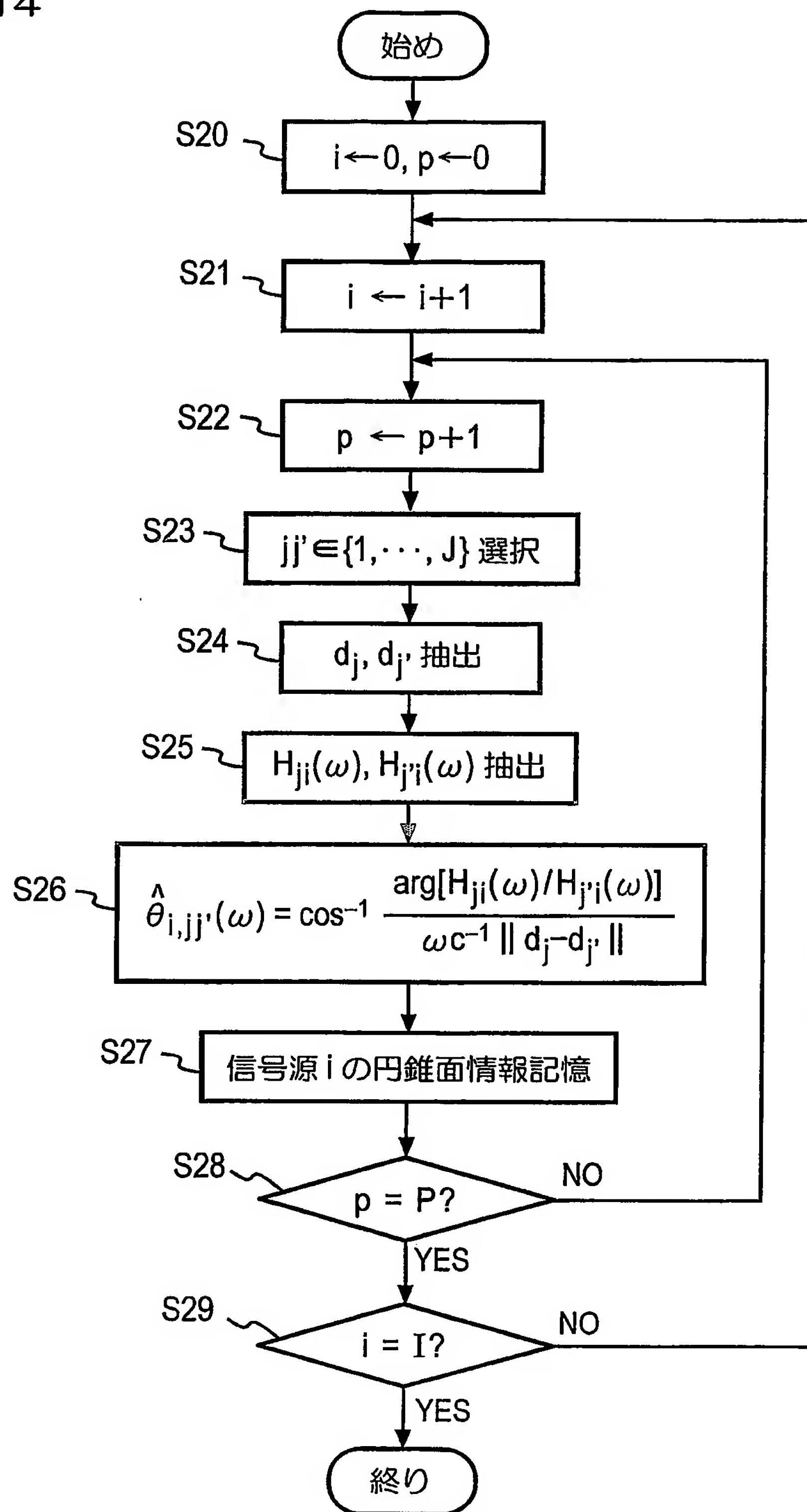


図15

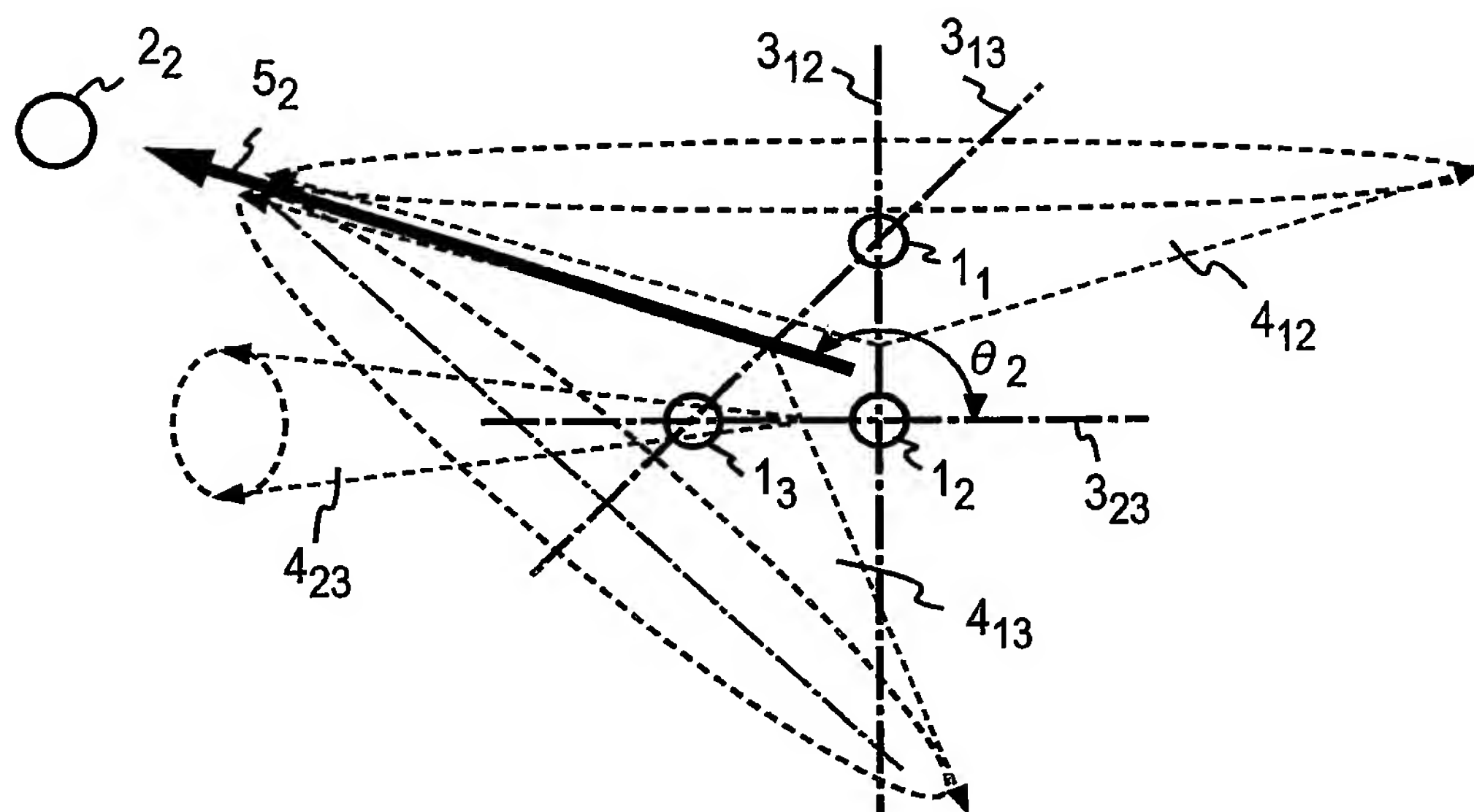
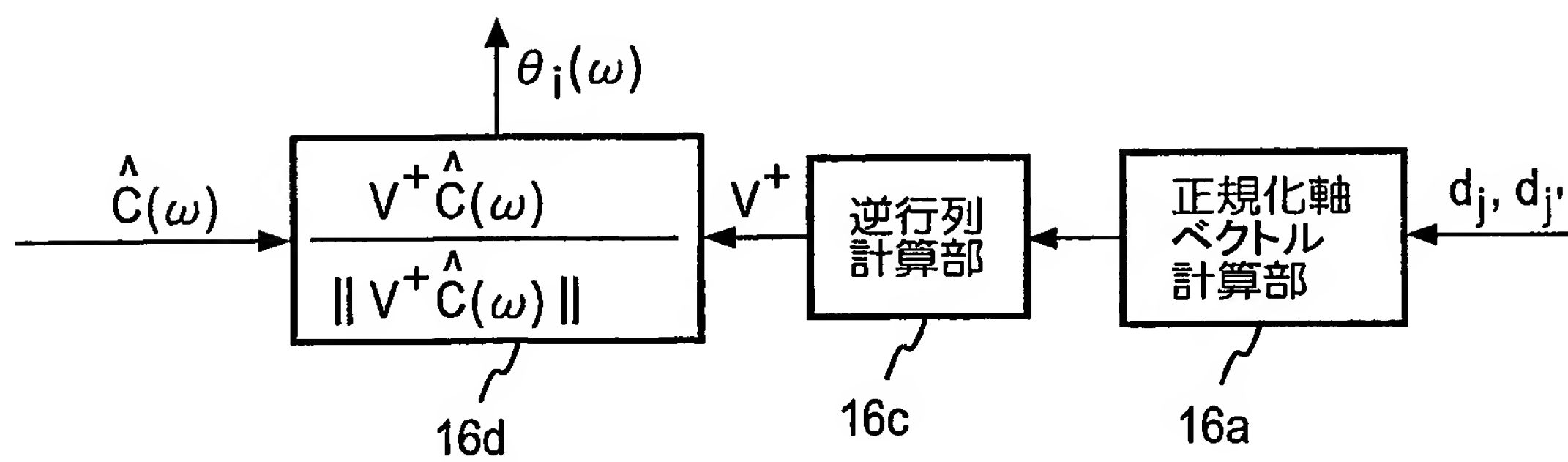


図16



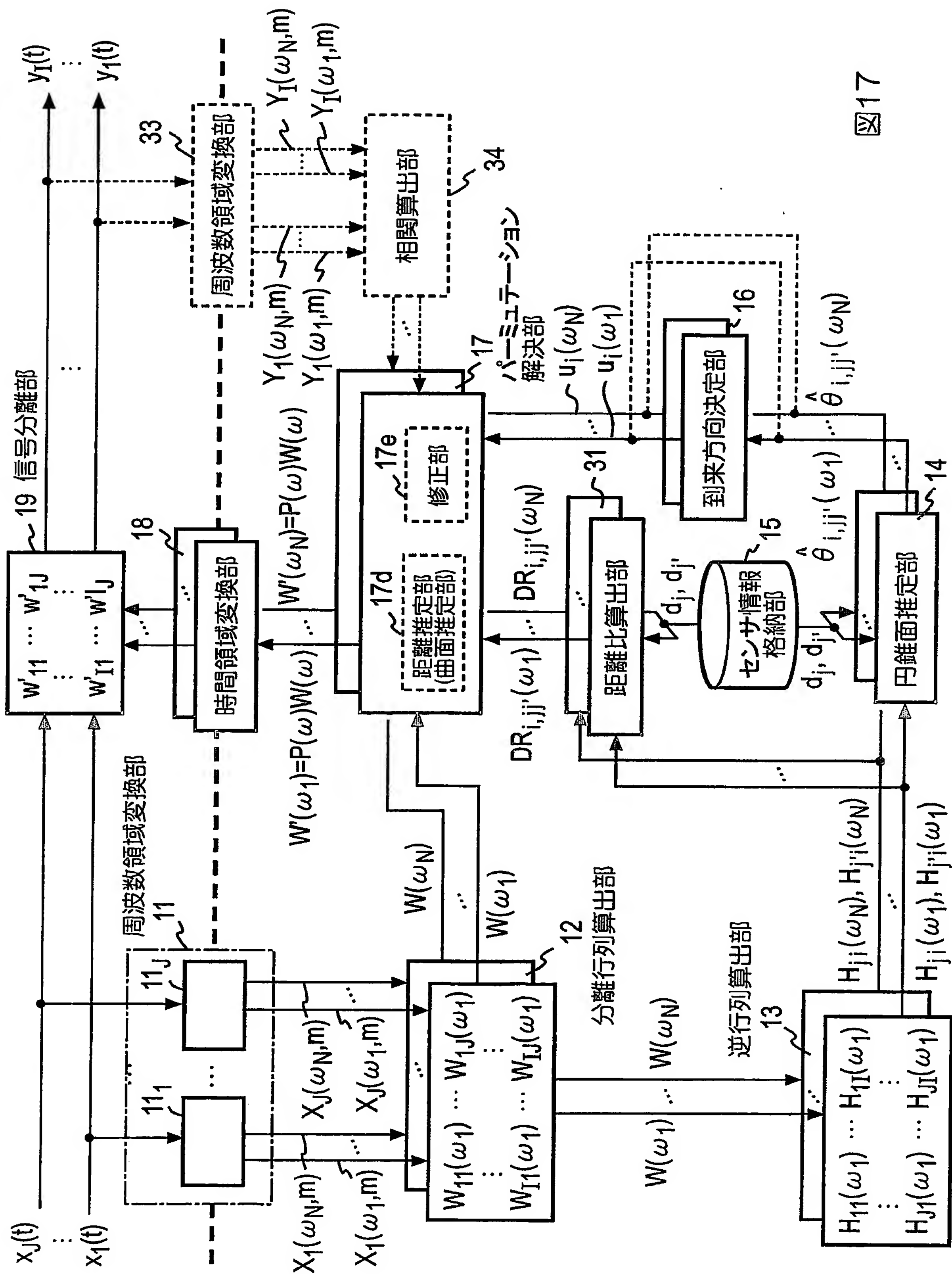
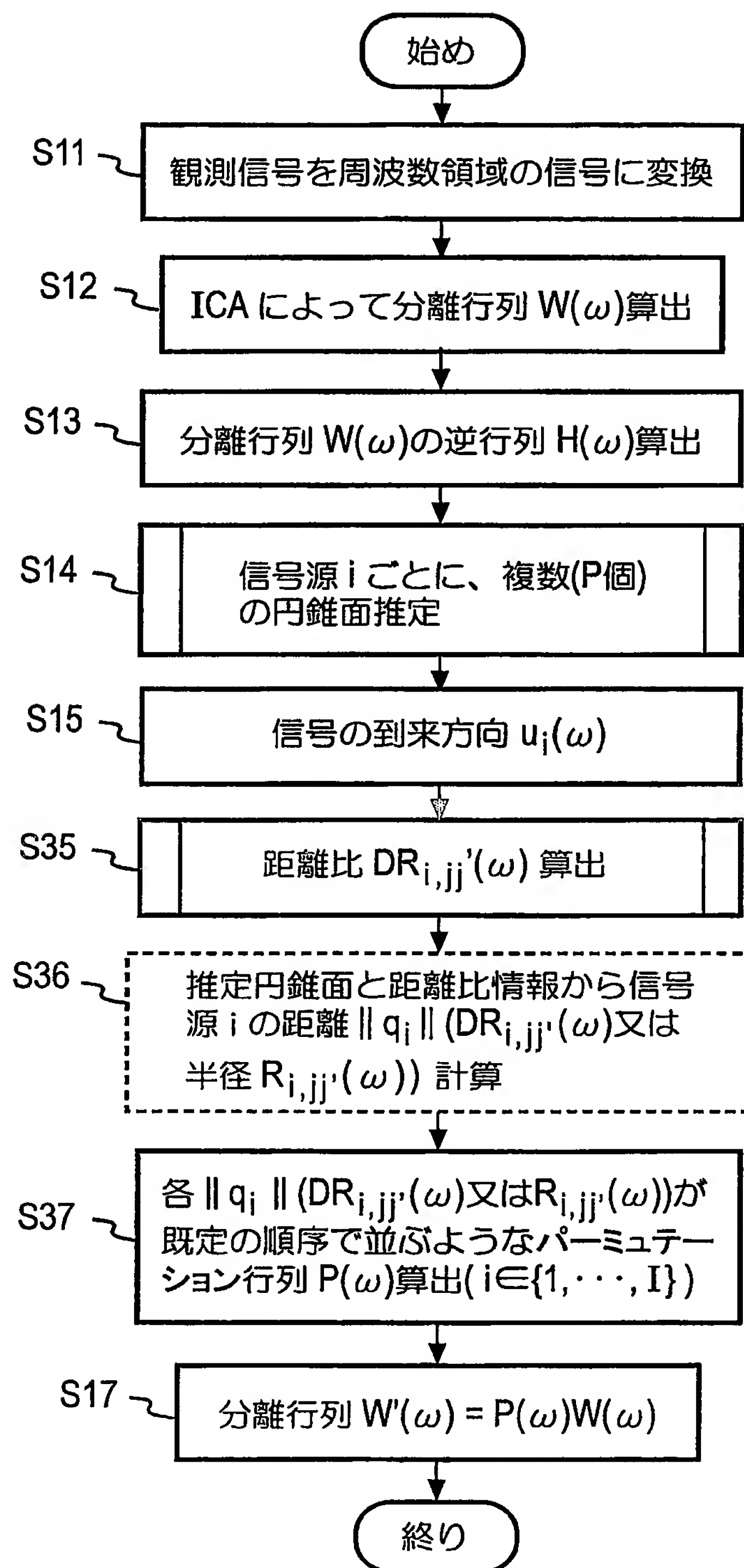


図17

15/22

図18



16/22

図19

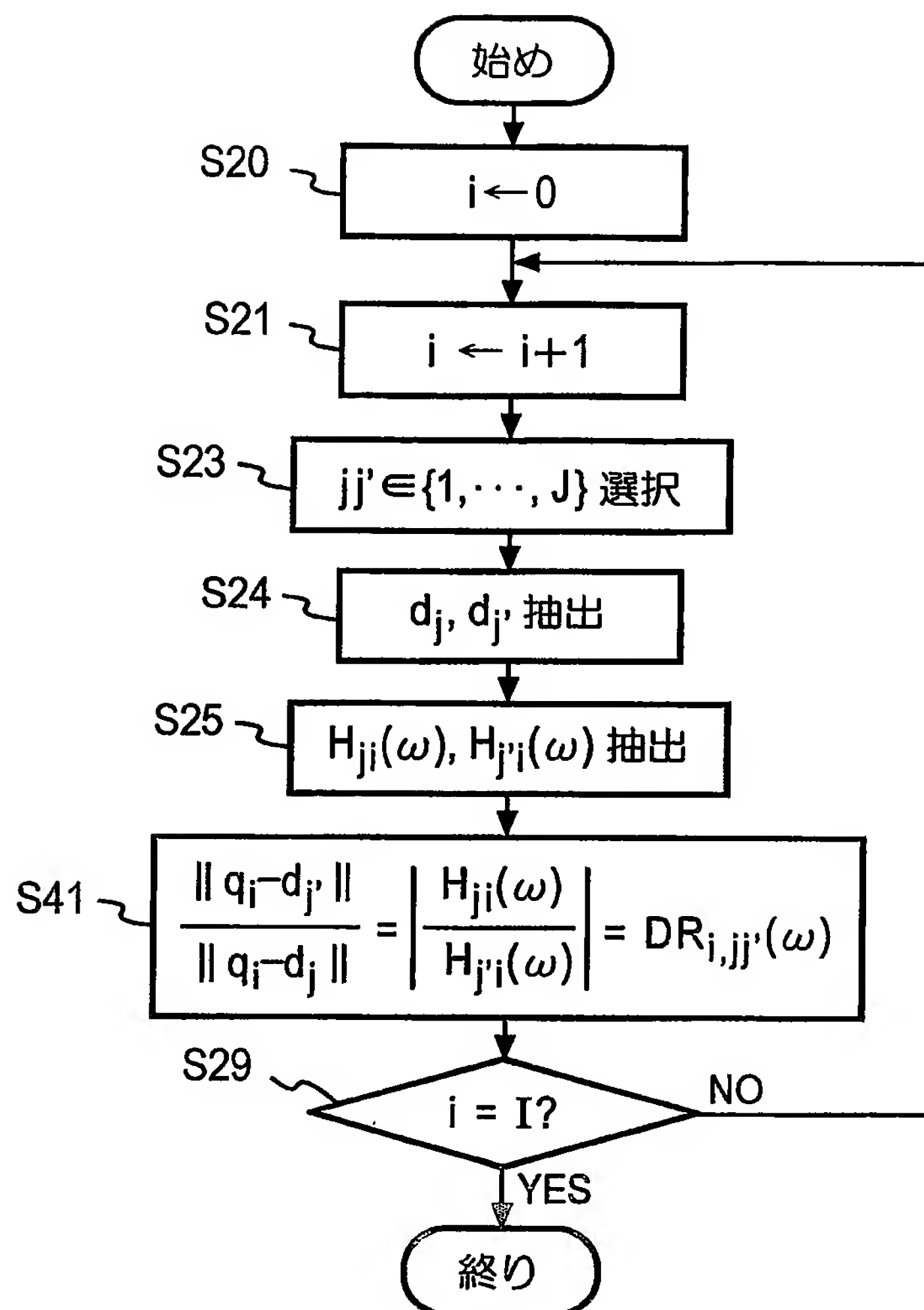
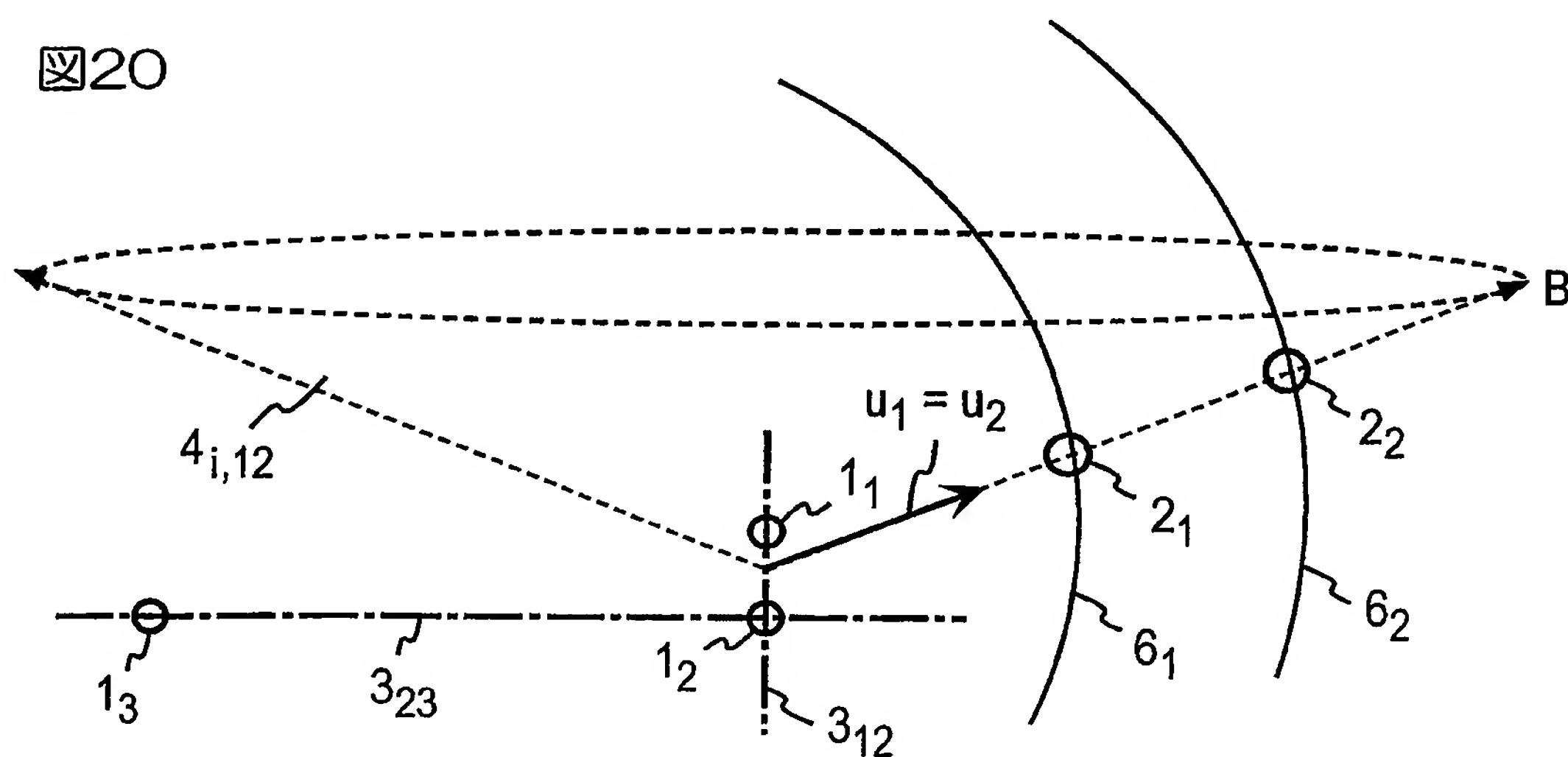


図20



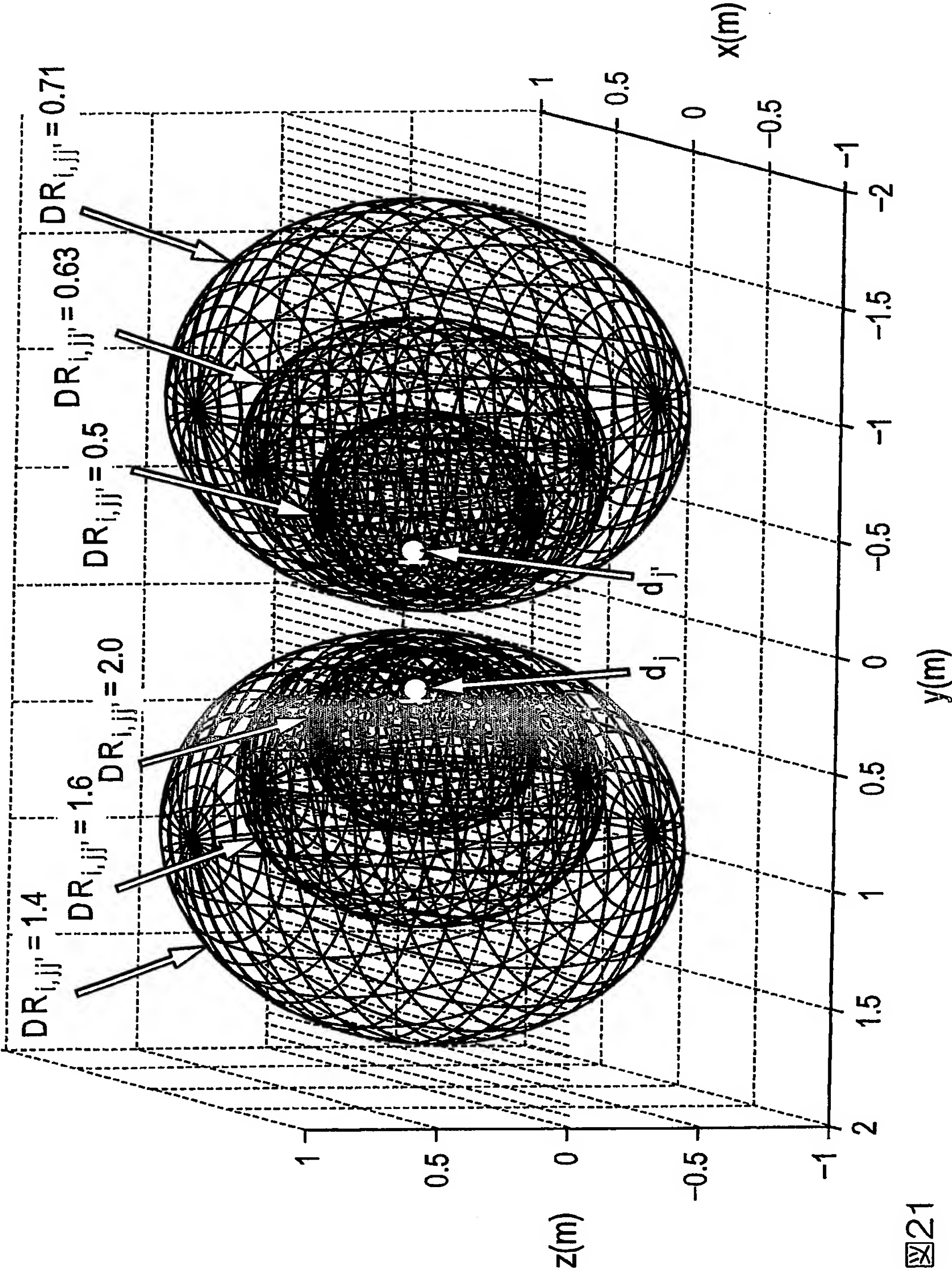


図21

18/22

図22

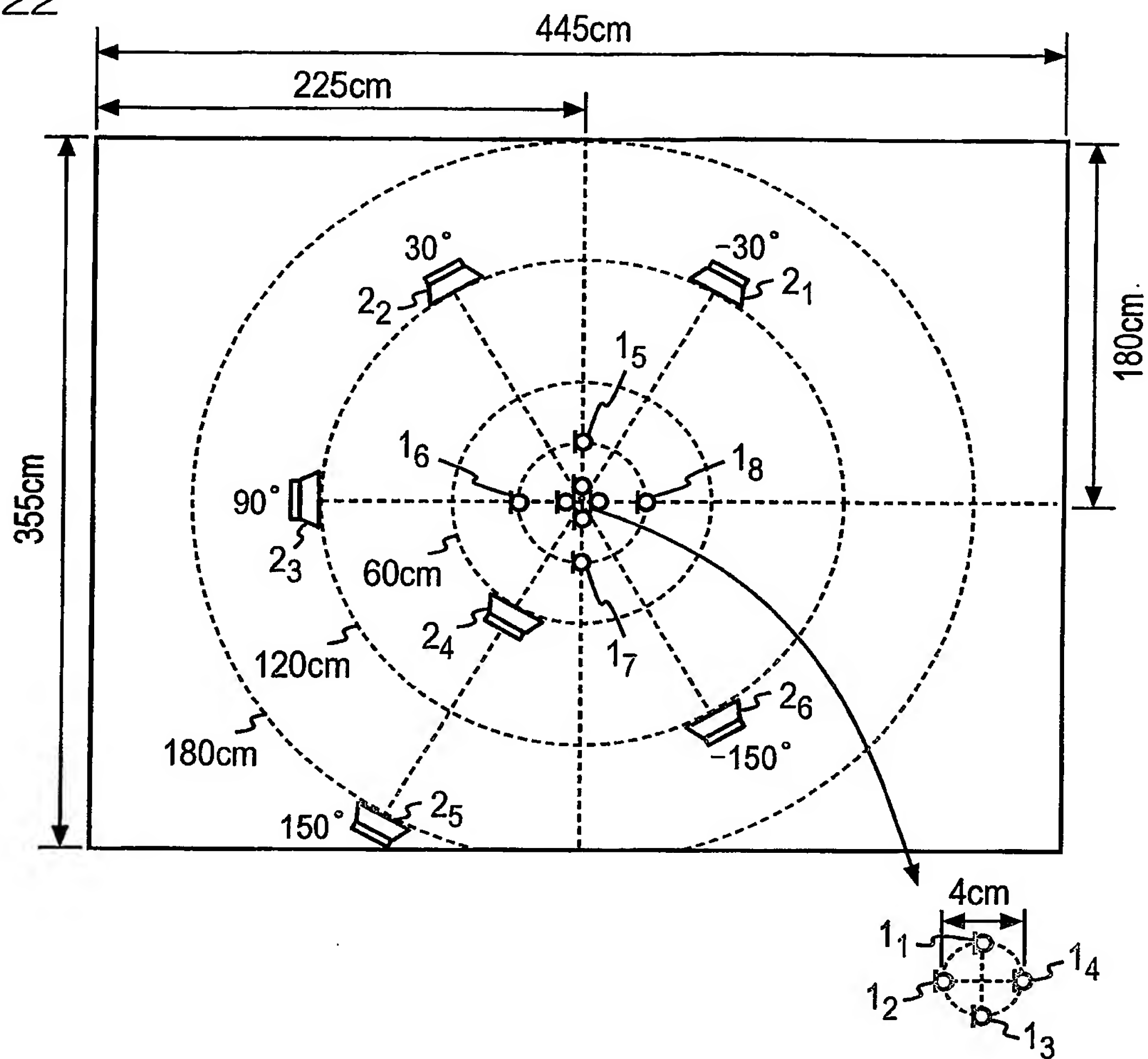


図23

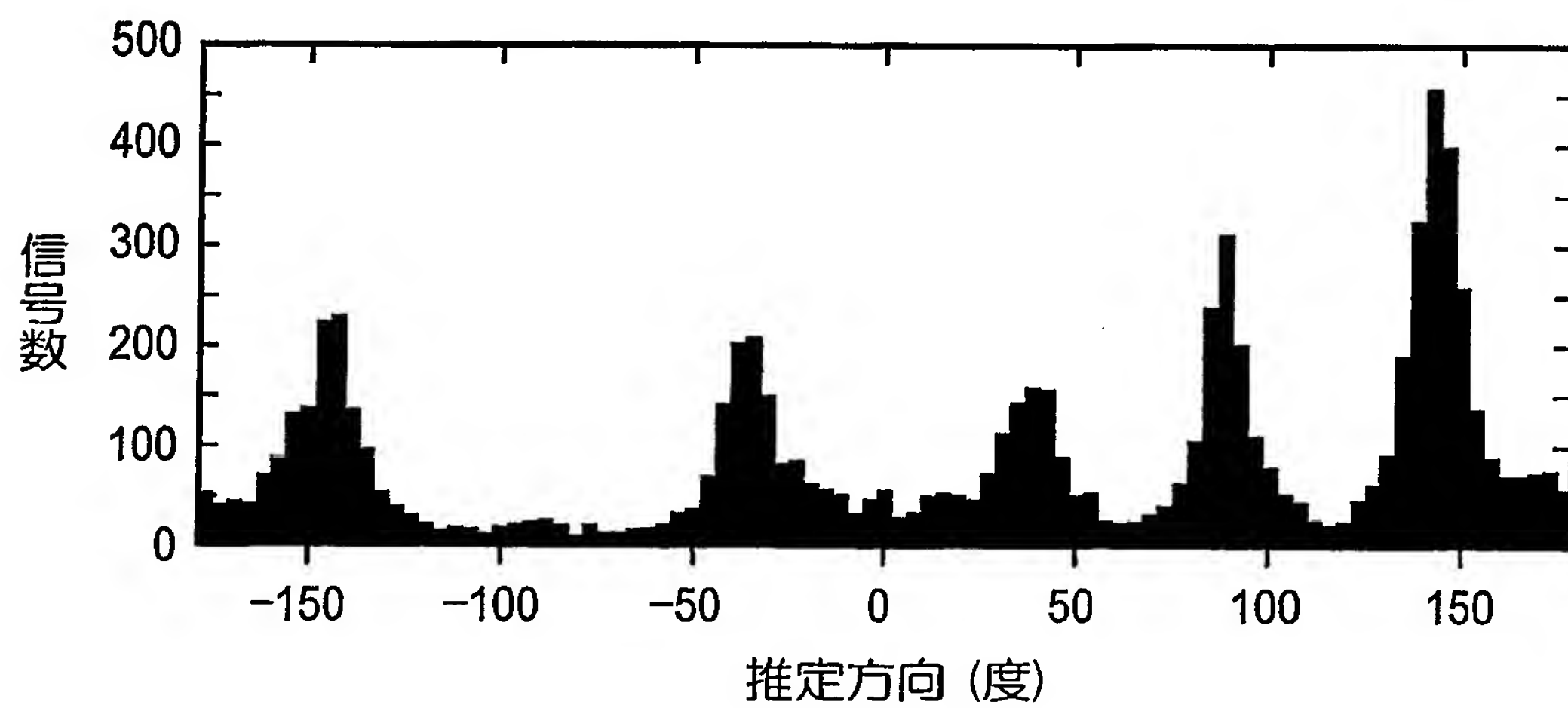


図24

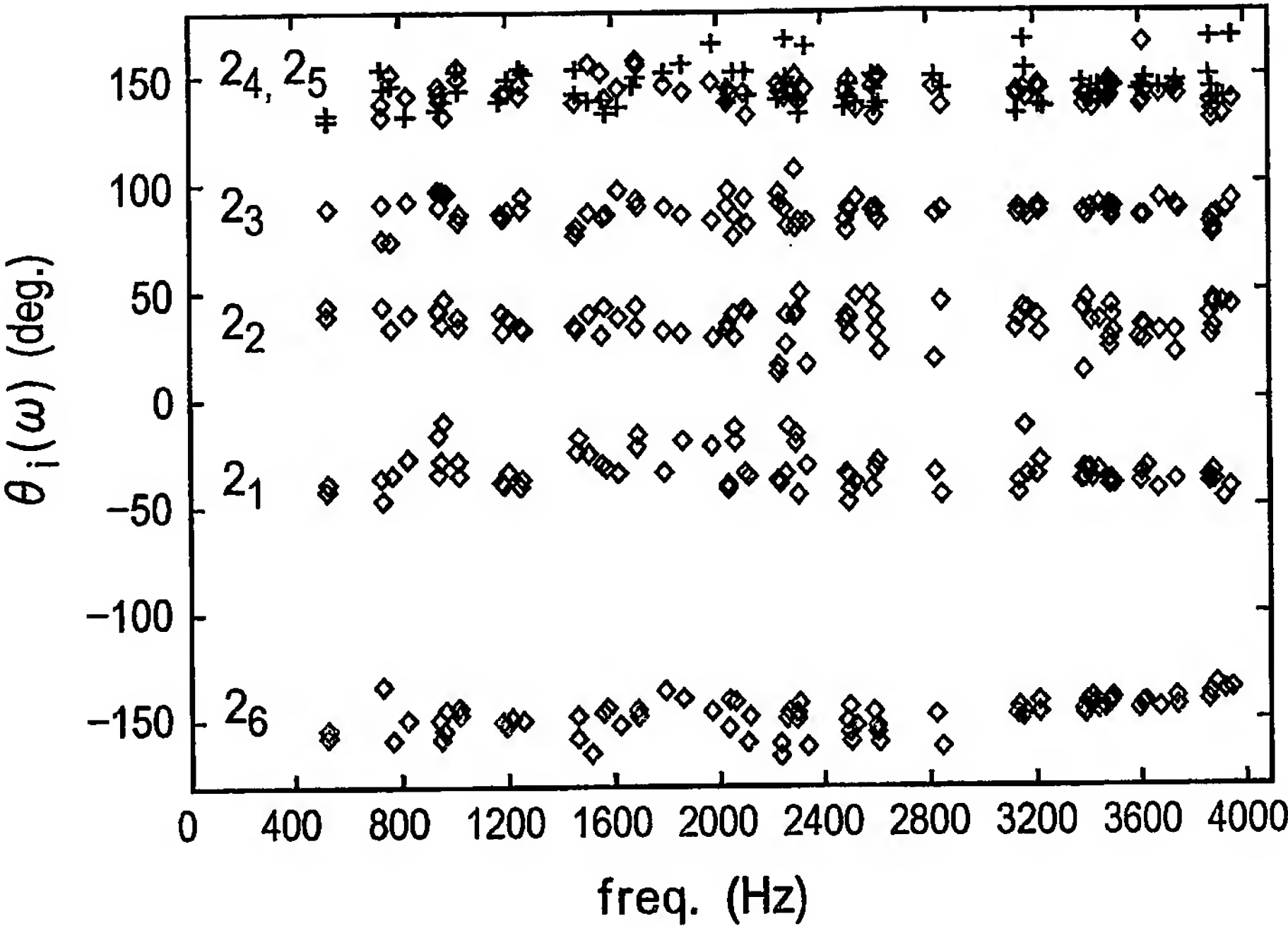


図25

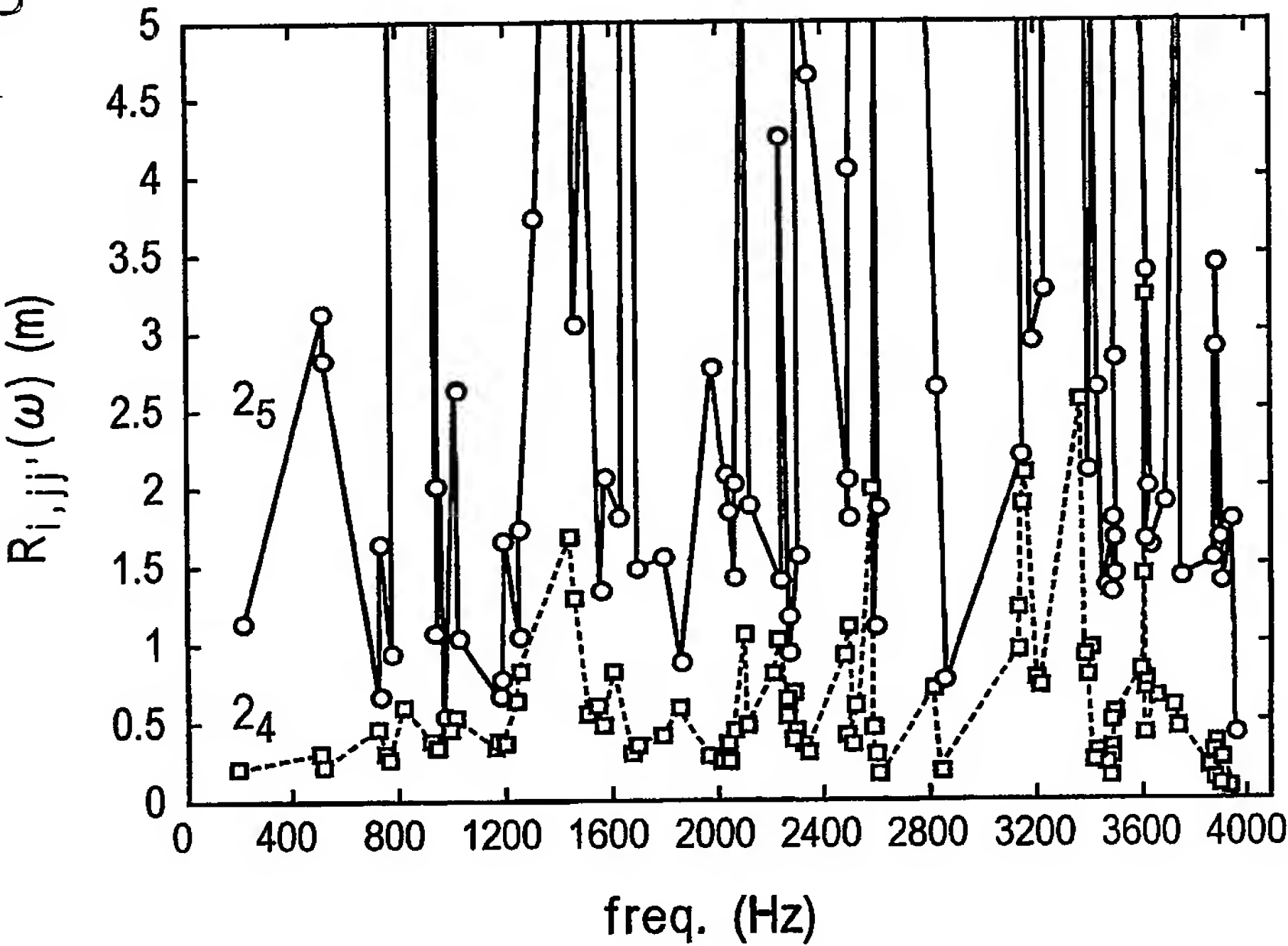


図26

(dB)

	SIR ₁	SIR ₂	SIR ₃	SIR ₄	SIR ₅	SIR ₆	平均
入力 SIR	-8.3	-6.8	-7.8	-7.7	-6.7	-5.2	-7.1
C	4.4	2.6	4.0	9.2	3.6	-2.0	3.7
D+C	4.5	10.8	14.4	4.5	5.4	8.8	8.1
D+S+C	12.3	5.6	14.5	7.6	8.9	10.8	10.0

図27

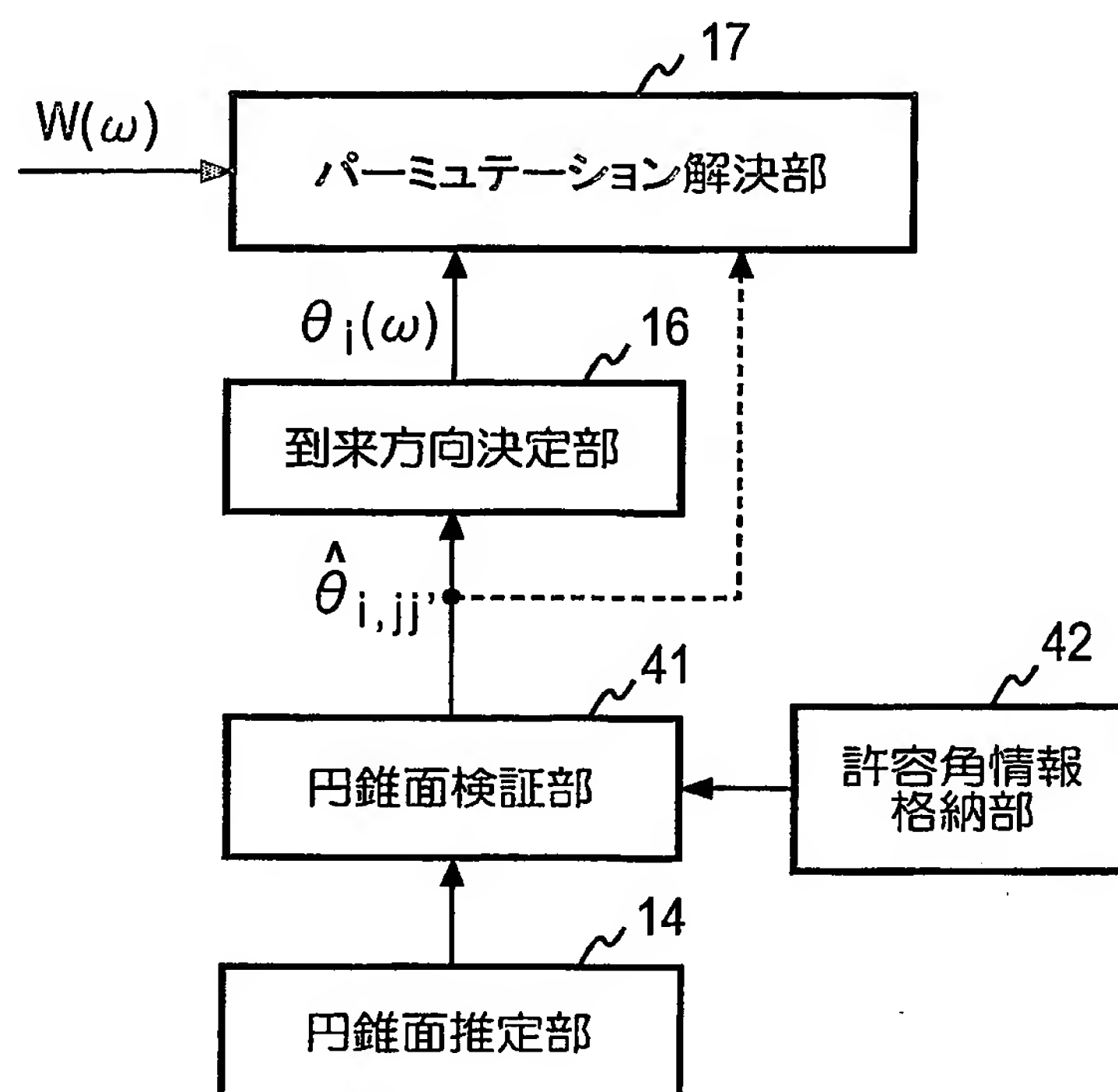


図28

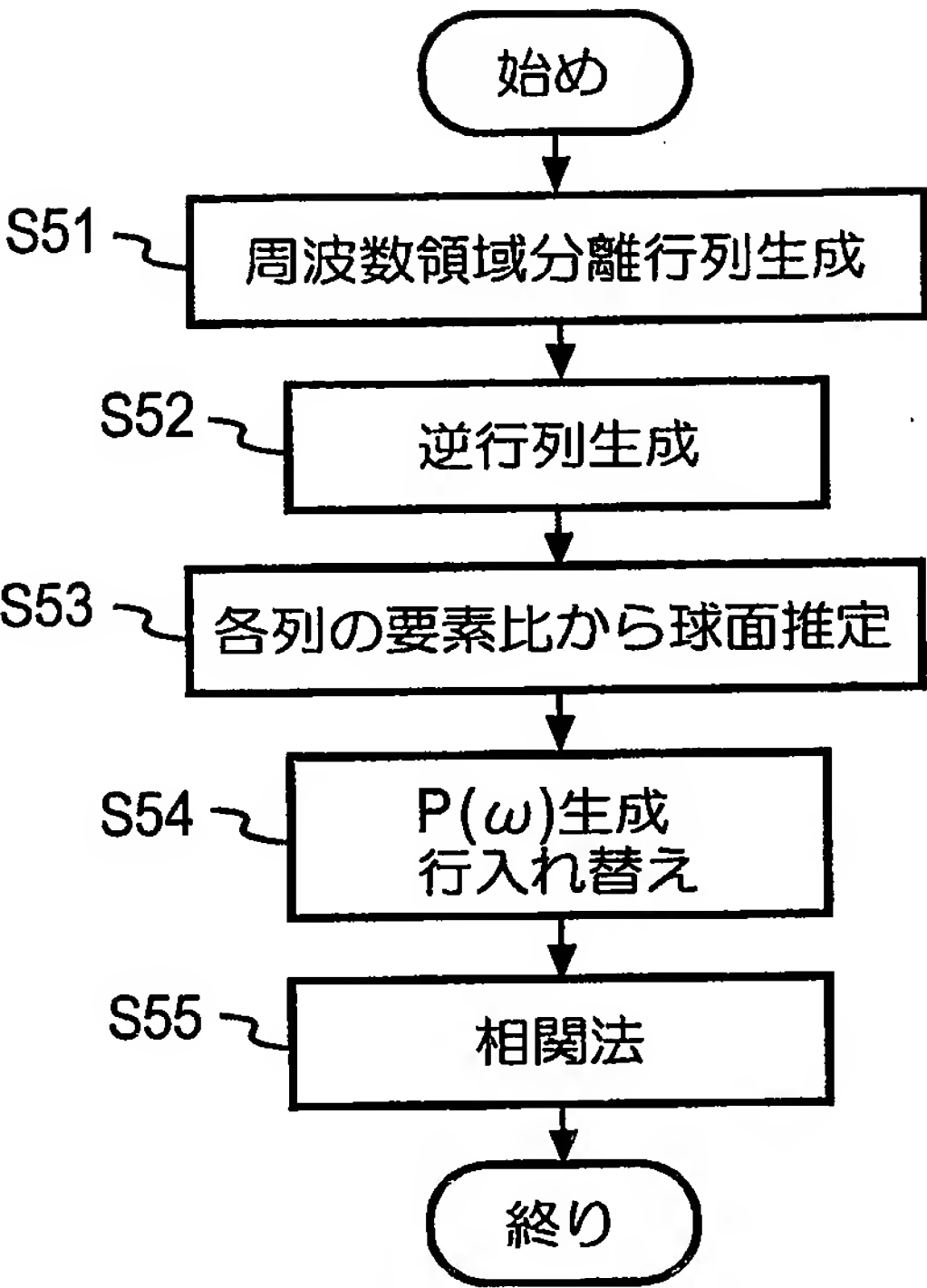


図29

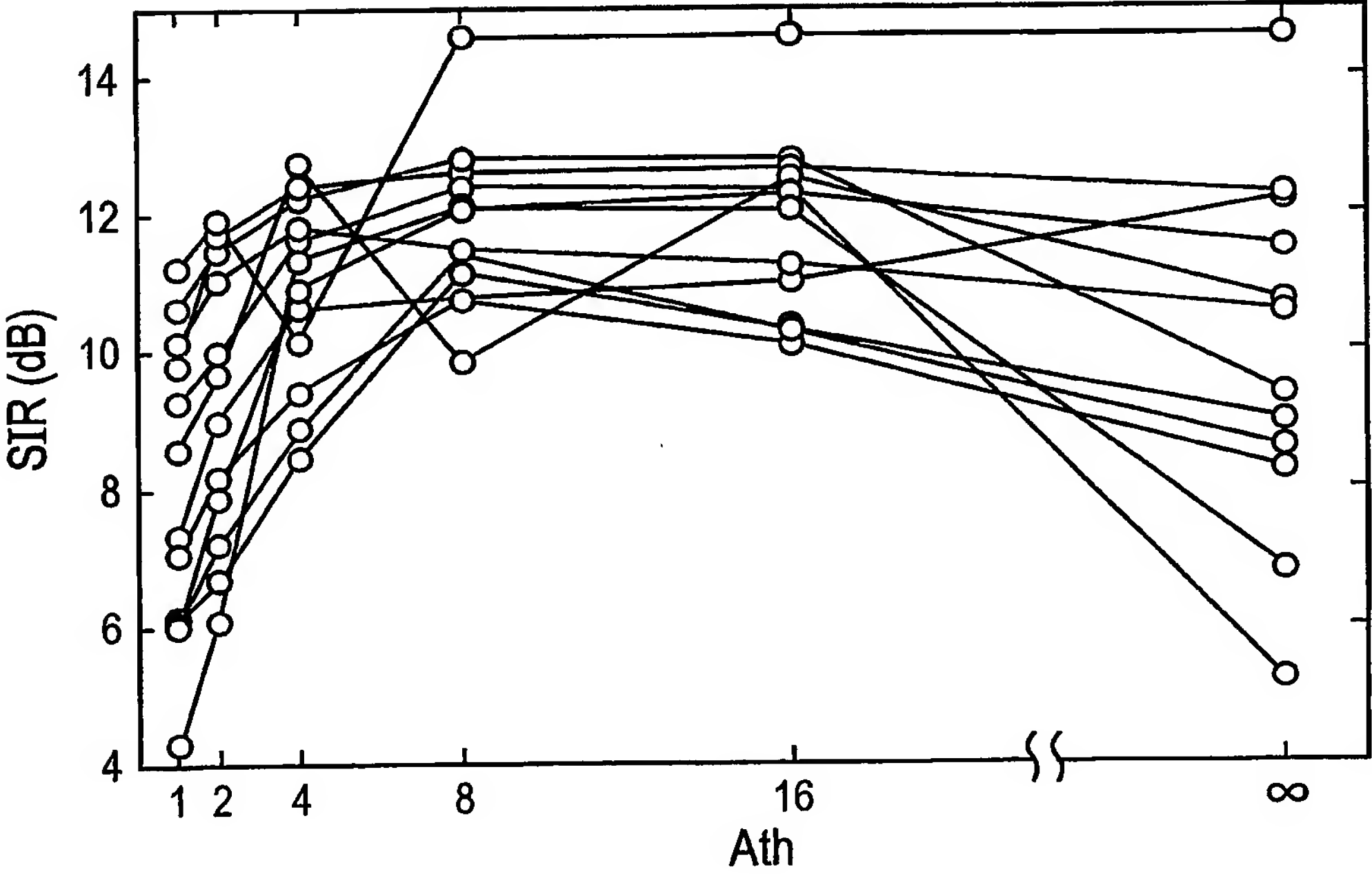


図30A

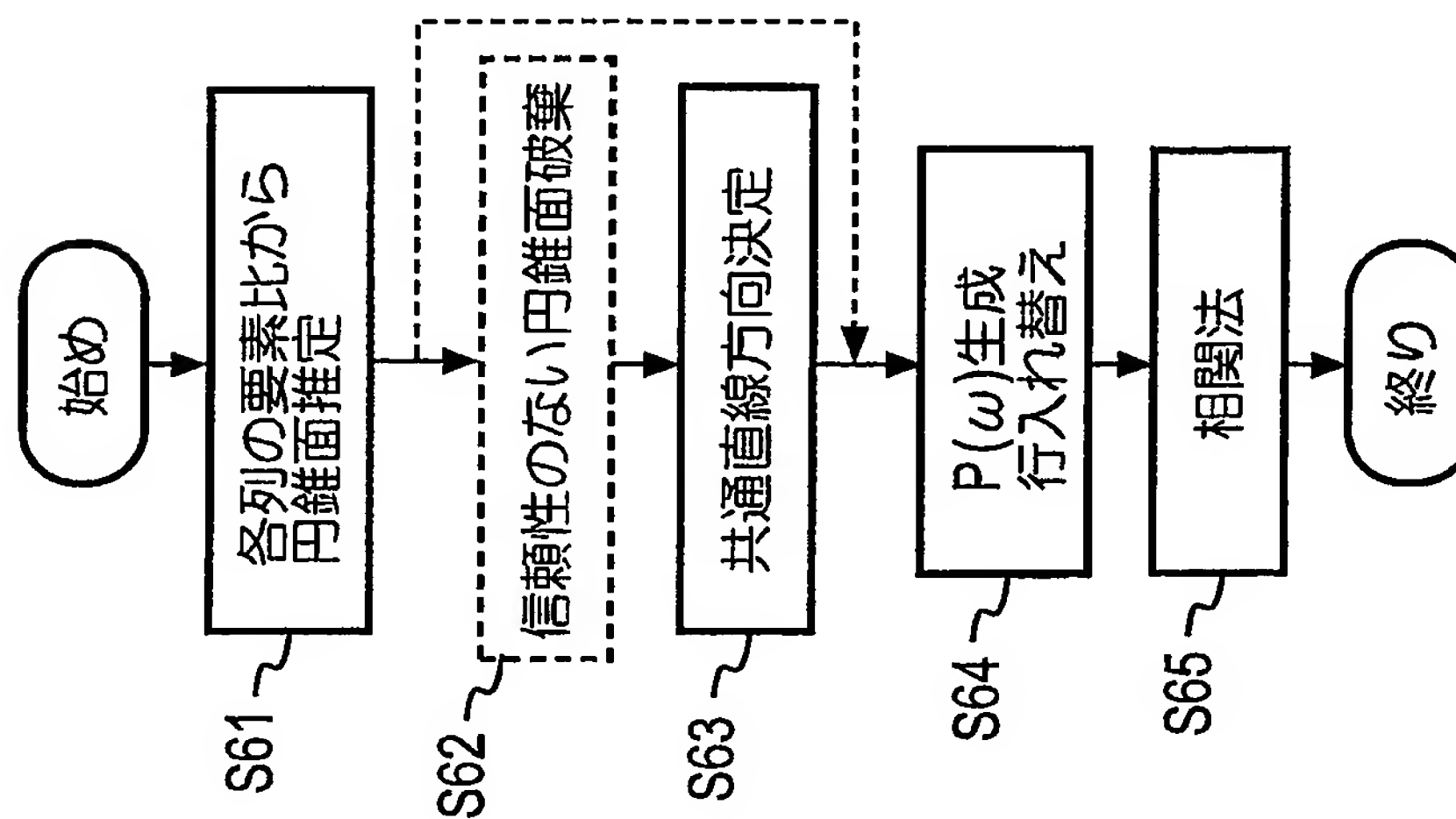


図30B

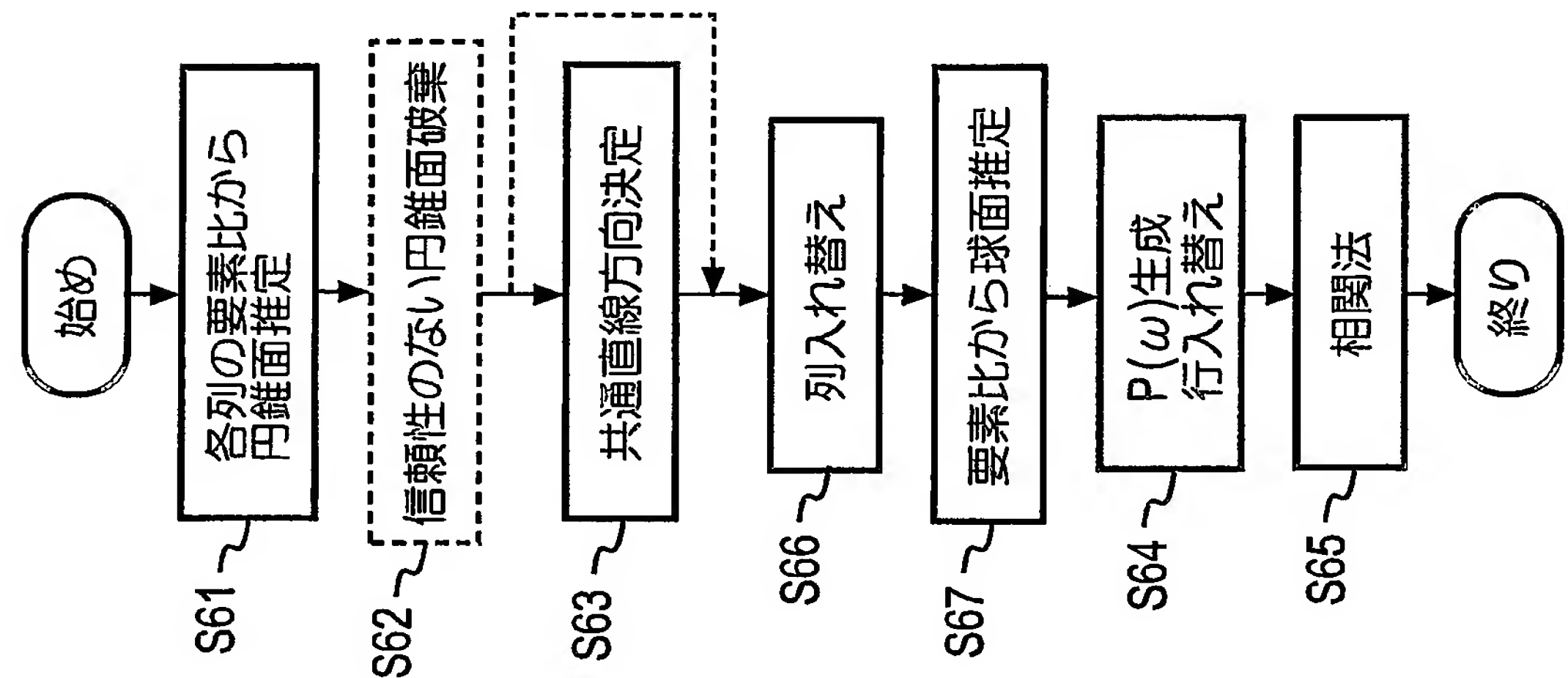


図30C

